B 普通高等教育机电类规划教材

精密和超精密加工技术

精密和超精密

哈尔滨工业大学 袁哲俊
清 华 大 学 王先逵 主编

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

精密和超精密加工技术

主编　袁哲俊　王先逵
参编　袁巨龙　段广洪
（按章节顺序排列）



机械工业出版社

精密和超精密加工技术近年来获得飞跃发展。本书是全面系统讲述精密和超精密加工技术的书，内容包括：超精密切削和金刚石刀具，精密和超精密磨削、研磨与抛光，精密和超精密机床，精加工中的测量技术和在线误差补偿，微细加工技术，精加工的支撑环境，纳米技术。本书内容丰富，不仅系统讲述了精密加工的基础原理和技术，新技术在精加工中的应用，还介绍了国内外的最新发展和成就。本书可供机制专业研究生和本科生作教材，同时也是科技人员的重要参考书。

图书在版编目（CIP）数据

精密和超精密加工技术/袁哲俊等主编．—北京：机械工业出版社，1999．10
普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-07155-7

Ⅰ．精…　Ⅱ．袁…　Ⅲ．①金属加工，精密-高等学校-教材②超精加工-高等学校-教材　Ⅳ．TG506．9

中国版本图书馆 CIP 数据核字（1999）第 18170 号

出 版 人：马九荣（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
责任编辑：高文龙　版式设计：冉晓华　责任校对：程俊巧
封面设计：李　丽　责任印制：何全君
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1999 年 7 月第 1 版第 1 次印刷
787mm×1092mm 1/16·14.75 印张·356 千字
0 001—5 000 册
定价：20.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（010）68993821、68326677-2527

前　言

精密和超精密加工技术是机械制造业中最重要的部分之一，这是因为精密和超精密加工技术不仅直接影响尖端技术和国防工业的发展，而且还影响机械产品的精度和表面质量，影响产品的国际竞争力。例如陀螺仪现在是用超精密切削等方法加工的，它的精度直接影响导弹的命中精度。大规模集成电路的制造，使用了超精密研磨和微细加工等技术，它的加工工艺水平决定了集成电路上的线宽和元件数，直接影响微电子工业和计算机技术的发展。世界各国都非常重视发展精密和超精密加工技术，把它作为发展先进制造技术中的优先发展内容。

近年来各种新技术，例如微电子技术、计算机技术、自动控制技术、激光技术等在精密加工中得到广泛的应用，使精密和超精密加工技术产生了飞跃的发展，大大地改变了它的技术面貌。精密加工技术的水平已是机械制造业水平的重要标志。当代的精密工程，其中包括精密加工，超精密加工技术，微细加工技术和纳米技术是现代制造业的前沿，也是明天制造技术的基础。

机械产品要求的精度不断提高，促使精密加工技术水平的迅速发展，精密和超精密加工达到的精度也在不断提高。在50年代精密加工能达到的精度水平是3～5μm，超精密加工达到的精度是1μm。到70年代后期，精密加工达到的精度水平是1μm，超精密加工达到的精度是0.1μm，而现在精密加工达到的精度水平是0.1μm，超精密加工达到的精度已是0.01～0.001μm。

近年来由于受到各方面的重视，我国的精密和超精密加工技术获得了很大的发展，超精密切削技术已获得较多生产应用，超精密机床已研制成功，多种精度甚高的精密机械和仪器已能生产，微细加工技术也已发展到相当水平。但应看到我国的精加工技术水平与发达国家比较还有相当大的差距。例如数控超精密车床我国还没有正式产品，大型超精密机床国内还没有。标志制造大规模集成电路水平的微细加工，我国现在导线的光刻加工，其线宽只能达到0.5～1μm，国外生产中已可达0.1μm，而实验室正在研究的是0.01μm宽度，故国外生产的每个集成电路可以有数百万个元件，而我国则相差甚多。精密和超精密加工技术，因涉及尖端技术和国防工业的发展，关键的技术各国都保密，不允许技术转让或出口。各国都是自己投力量研究开发这方面的技术。因此我国也亟需加速发展这方面的技术。

高等学校的机械制造专业已是成立多年的较老的学科。近年来由于多种新技术在机械制造中的应用，机械制造业的面貌发生了极大的变化。学校的机械制造专业也面临改造，要求更新教学内容，增设新课程以跟上机械制造技术的发展。很多高等学校为研究生设立了精密和超精密加工技术的课程，同时也为本科生新开了精密加工的选修课。

本书系统全面地讲述了精密和超精密加工技术的各部分主要内容，收集了国内、外精密加工的大量资料文献，且结合了哈尔滨工业大学和清华大学等校多年来从事精密和超精密加工的研究成果而写成的。本书不仅系统讲授了精密加工的基础原理和技术，新技术在精加工中的应用，还介绍了国内外精密加工的最新发展和成就。

本书内容包括精加工涉及的全部主要为容：超精密切削和金刚石刀具，精密和超精密磨

削、研磨与抛光，精密和超精密机床设备，精密加工中的测量技术，在线测量和误差补偿技术，微细加工技术，精加工的支撑环境，典型精密零件的加工工艺，纳米技术。本书试图解决国内需要发展精密加工技术，而缺少这方面的科技书和教材的困难，可供机制专业研究生和本科学生作教材，同时也可供从事机械制造精密加工工作的科技人员作为一本重要的参考书。

本书各章的编者如下：第一、四章袁哲俊，第二章袁哲俊、周明，第三、六、八章王先逵，第五章袁哲俊、谢大纲、王晓蕙，第七章袁巨龙，第九章段广洪，第十章袁哲俊、高栋。由袁哲俊和王先逵担任主编。

由于作者水平所限和编写时间仓促，书中错误和不足之处，希望读者给予指正。

编者

1999 年 1 月

目　　录

第一章　精密和超精密加工技术及其发展展望

第一节　发展精密和超精密加工技术的重要性

机械工业是国民经济发展的基础，因为它需要为其它生产部门提供技术装备。机械工业提供技术装备的水平和质量，将直接影响国民经济各部门生产技术水平的高低和经济效益的好坏。因此加强发展机械制造工业是发展国民经济的一项关键性措施；是加强经济竞争能力的强有力的手段。

在平时机械制造工业将为国民经济提供各种商品和机器设备，在战时将提供武器。因此机械工业是经济现代化和国防现代化的基础工业部门。据国外统计，在经济发展阶段，机械工业的发展速度要高出整个经济发展速度20%～25%。历史证明，哪一个国家不重视机械制造工业，它就会遭到历史的惩罚。

美国过去长期在机械制造技术上处于领先地位，但在第二次世界大战后不重视机械制造工业，新技术研究开发不力，对机械制造专业人才不重视培养，日本则大力支持了机械制造工业的发展。两国政府的不同政策形成鲜明的对比，后果极为明显：70年代和80年代两国在汽车工业和微电子工业的竞争中，日本的汽车、摩托车、电视机、录音机、录像机、照相机等不仅大量抢占了美国原来的国际市场，而且大量进入美国国内市场。美国上述工业面临严重的威胁，美国公众惊呼这已危及国家安全。美国在关于工业竞争的总统委员会的报告中检讨：美国在重要而又高速增长的技术市场上失利的一个重要因素是没有将自己的技术应用到制造业上。美国工程科学院和国家研究理事会经过反复讨论，重新重视制造技术，而不是将制造列入到从属设计工程或设计风格的地位上。

我国现在的机械制造技术水平和国外相比还有相当大的差距，主要表现在两个发展方向上：一个是高度自动化技术，以FMS、CIMS和敏捷制造为代表；另一个是精密和超精密加工，以超精密加工为代表。这里只谈精密和超精密加工技术问题。

精密和超精密加工已经成为在国际竞争中取得成功的关键技术。因为许多现代技术产品需要高精度制造。发展尖端技术，发展国防工业，发展微电子工业等都需要精密和超精密加工制造出来的仪器设备。当代的精密工程、微细工程和纳米技术是现代制造技术的前沿，也是明天技术的基础。

目前，在工业发达国家中，一般工厂能稳定掌握的加工精度是1μm，与此相应，通常将加工精度在0.1～1μm，加工表面粗糙度在R_a0.02～0.1μm之间的加工方法称为精密加工，而将加工精度高于0.1μm，加工表面粗糙度小于R_a0.01μm的加工方法称为超精密加工。

现代机械工业之所以要致力于提高加工精度，其主要的原因在于：提高制造精度后可提高产品的性能和质量，提高其稳定性和可靠性；促进产品的小型化；增强零件的互换性，提高装配生产率，并促进自动化装配。

超精密加工技术在尖端产品和现代化武器的制造中占有非常重要地位。例如：对于导弹

来说，具有决定意义的是导弹的命中精度，而命中精度是由惯性仪表的精度所决定的。制造惯性仪表，需要有超精密加工技术和相应的设备。例如：美国民兵Ⅱ型洲际导弹系统陀螺仪的精度为0.03°～0.05°/h，其命中精度的圆概率误差为500m，而MX战略导弹（可装载10个核弹头）制导系统陀螺仪精度比民兵Ⅲ型导弹高出一个数量级，从而保证命中精度的圆概率误差只有50～150m。如果1kg重的陀螺转子，其质量中心偏离其对称轴0.5nm，则会引起100m的射程误差和50m的轨道误差。惯性仪表中有许多零件的制造精度都要求达到小于微米级。例如：激光陀螺的平面反射镜的平面度为0.03～0.06μm，表面粗糙度为0.012μm以下，反射率为99.8%。人造卫星的仪表轴承是真空无润滑的轴承，其孔和轴的表面粗糙度达到R_{max}㊀=1nm（0.001μm），其圆度和圆柱度均以nm为单位。雷达的关键元件波导管，其品质因数与内表面的粗糙度有很大关系。内腔表面粗糙度值越小越好。其端面要求有很小的粗糙度、垂直度和平面度值。采用超精密车削，波导管内腔粗糙度可达R_a0.01～0.02μm或≯0.01μm，端面粗糙度可达≯0.01μm，平面度小于0.1μm，垂直度小于0.1μm，可使波导管的品质因数值达到6000，而用一般方法生产的只能达到2000～4000。红外探测器中接收红外线的反射镜是红外导弹的关键性零件，其加工质量的好坏决定了导弹的命中率。该反射镜表面的粗糙度要求达到R_a0.015～≯0.01μm。只有采用超精密车削，方能满足上述要求。

又如，已被美国航天飞机送入空间轨道的，用来摄制亿万公里远星球图象的哈勃望远镜（HST），其一次镜要求使用直径2.4m，重达900kg的大型反光镜，并且具有很高的分辨率。为此，专门研制了超精密加工（形状精度为0.01μm）光学玻璃用的6轴CNC研磨抛光机。由于HST计划的实施，大大促进了硬脆材料的超精密加工技术，发展了能反馈加工精度信号的CNC研磨加工技术。从上所述，可以看出只有采用超精密加工技术才能制造精密陀螺仪、精密雷达、超小型电子计算机及其它尖端产品。

又如据英国Rolls—Royce公司的资料，若将飞机发动机转子叶片的加工精度由60μm提高到12μm，而加工表面粗糙度R_a由0.5μm减小到0.2μm，则发动机的压缩效率将从89%提高到94%。又传动齿轮的齿形及齿距误差若能从目前的3～6μm降低到1μm，则单位齿轮箱重量所能传递的扭距将近提高一倍。

大规模集成电路的发展，促进了微细工程的发展，并且密切依赖于微细工程的发展。因为集成电路的发展要求电路中各种元件微型化，使有限的微小面积上能容纳更多的电子元件，以形成功能复杂和完备的电路。因此，提高超精密加工水平以减小电路微细图案的最小线条宽度就成了提高集成电路集成度的技术关键（表1-1）。

表1-1 集成度与最小线条宽度

参数与性能 / 分类名称	单元芯片上的单元逻辑门电路数	单元芯片上的电子元件数	最小线条宽度 μm
小规模集成电路	<10～12	<100	≤8
中规模集成电路	12～100	100～<1000	≤6
大规模集成电路	>100～<10^4	1000～<10^5	3～6
超大规模集成电路	≥10^4	≥10^5	0.1～2.5

㊀ 此为日本标准，相当于我国R_y。

目前工业发达国家都在发展微细加工技术，为减小“线宽”而奋斗。日本研究与开发公司的高技术探索研究项目(ERATO)正在探索在硅基片上以黄金作为导体，加工出 20nm 的线宽，并已论证 5nm 的线宽在理论上是可行的。其目标是指向下一代的电子装置，即所谓静电感应晶体管(SIT)。美国国防部的甚高速集成电路项目(VHSIC)，正在试图将集成电路的线宽比目前减小 10 倍。英国格拉斯哥大学于 1985 年以电子束加工技术，加工出 30nm 的线宽。

计算机磁盘的存贮量在很大程度上取决于磁头与磁盘之间的距离(即所谓“飞行高度”，Flying Height)，目前已达到 0.3μm，近期内可争取达到 0.15μm。为了实现如此微小的“飞行高度”，要求加工出极其平坦、光滑的磁盘基片及涂层。IBM 公司开发的磁盘，其记忆密度在 1957 年为 300bit/cm^2，而 1982 年已达到 254 万 bit/cm^2，即在 25 年内增加一万倍，这除了原材料和涂层技术的改进外，在很大程度上应归功于超精密加工带来的磁盘基片加工精度的提高和表面粗糙度的减小。

当代多种加工方法所能达到的精度，及其发展趋势预测，见图 1-1。

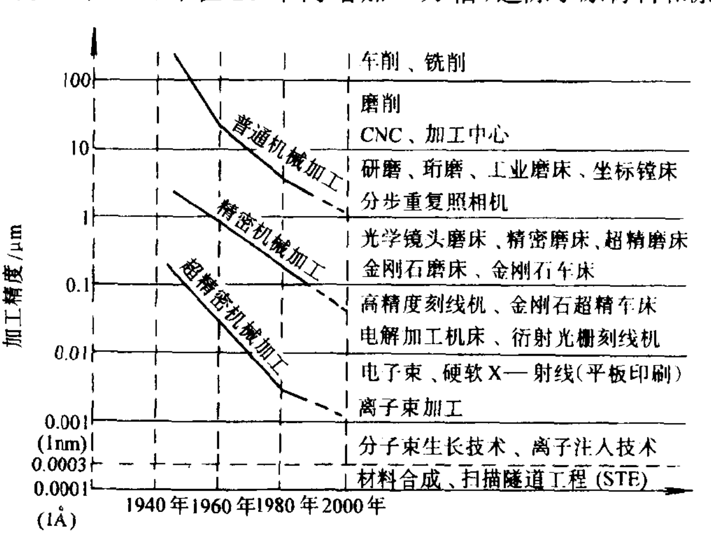


图 1-1 各种加工方法所能达到的精度及其发展趋势预测

由图中可见，预计到 2000 年普通机械加工、精密加工与超精密加工的精度可以分别达到 1μm，0.01μm 及 0.001μm(1nm)。而且可见精密工程正在向其终极目标—原子级精度的加工逼近，也就是做到“移动原子”。为了达到这一目标，各工业发达国家都在努力冲刺。日本的 ERATO 计划中，纳米技术作为其六项优先技术之一，在由政府、大学和工业界联合开发。材料在纳米范围内的物理力学性能将予以分析，基本的测试系统与加工设备正在研制中。美国的 VHSIC 计划正在进行，海军研究室(Office of Naval Research)正在资助几所学校精密工程的研究项目。美国精密工程学会(American Society for Precision Engineering)已经成立。在大学和工业界有七个小组正在扫描隧道工程方面进行卓有成效的研究工作。在 Arizona 大学，纳米技术工作站(NEWS)已经开始工作。在英国国家纳米技术(NION)计划已开始实行，纳米技术战略委员会(Nanotechnology Strategy Committee)已建立，正在实行合作的研究计划，1990 年 6 月英国正式出版《纳米技术》学术期刊。

在过去相当的一段时期，精密加工，特别是超精密加工的应用范围很狭窄。近十几年来，随着科学技术和人们生活水平的提高，精密和超精密加工不仅进入了国民经济和人民生活的各个领域，而且从单件小批生产方式走向大批量的产品生产。例如：磁带录像机的磁鼓加工精度要求很高，是超精密加工的典型零件，而录像机的产量在 1985 年已达到 3300 万台。在机械制造行业，已经改变了过去那种将精密机床放在后方车间，仅用于加工工具，卡具，量具的陈规。现在，工业发达国家已经将精密机床搬到前方车间，直接用于产品零件的加工。

超精密加工走向大批量产品生产的事实使人们不得不正视长期以来一直被忽视的问题：成本和效率，现代超精密加工不仅必须达到极高的加工精度和表面质量，同时应该保证成本低，效率高，成品率高。这对精密和超精密加工提出了更加严格的要求。

我国当前某些精密产品尚靠进口，有些精密产品靠老工人手艺，因而废品率极高。例如现在生产的某种高精度惯性仪表，从十几台甚至几十台中才能挑选出一台合格品，磁盘生产质量尚未完全过关，激光打印机的多面棱镜尚不能生产。1996 年我国进口精密机床价值达 23 亿多美元(主要是精密机床和数控机床)，相当于同年我国机床的总产值，某些大型精密机械和仪器国外还对我们禁运。这些都说明我国必须大力发展精密和超精密加工技术。

精密和超精密加工目前包含三个领域：

1）超精密切削，如超精密金刚石刀具切削，可加工各种镜面，它成功地解决了高精度陀螺仪，激光反射镜和某些大型反射镜的加工。

2）精密和超精密磨削研磨，例如解决了大规模集成电路基片的加工和高精度硬磁盘等的加工。

3）精密特种加工，如电子束，离子束加工，使美国超大规模集成电路线宽达到 0.1μm。

本书将重点介绍超精密切削和磨削加工技术，包括切削机理，金刚石刀具，超精密机床，精密测量，超精加工工艺，超精加工的环境条件等。

第二节　超精密加工技术的现状

一、超精密加工技术的新发展

超精密切削加工技术发展到今天，已经获得了重大的进展，超精密切削加工已不再是一种孤立的加工方法和单纯的工艺问题，而成为一项包含内容极其广泛的系统工程。实现超精密切削加工，不仅需要超精密的机床设备和刀具，也需要超稳定的环境条件，还需要运用计算机技术进行实时检测，反馈补偿。只有将各个领域的技术成就集结起来，才有可能实现超精密切削加工。

使用天然单晶金刚石刀具对超精密零件进行超精密切削，始于 50 年代末期。初期的被加工工件多为形状简单的圆柱表面、平面和球面，只要求达到 R_{max}0.1μm 的镜面即可。后来发展要求加工非球曲面反射镜，再发展要求加工大型反射镜。要求很高的形状精度和很小的表面粗糙度。

金刚石刀具的超精密切削加工技术，主要应用于两个方面：单件的大型超精密零件的切削加工和大量生产的中小型零件的超精密切削加工技术。

单件大型零件超精密金刚石刀具切削，以美国最为发达，居于世界领先地位。美国超精密加工技术的发展出于国防的需要，通过能源部激光核聚变的任务，以及陆海空三军制造技术开发计划等，对超精密金刚石切削机床的研究开发投入了巨额资金和大量人力。其最高水平是 LLL 实验室(Lowrence Livermore Laboratory)1983 年研制的第三号大型超精密金刚石车床(DTM-3 型)，该机可加工 ϕ2100mm，质量为 4500kg 和 1984 年研制的大型光学金刚石车床 LODTM，可加工 ϕ1625mm，质量 1360kg 的非球面工件，其加工精度可达 0.025μm，表面粗糙度 R_a0.0045μm。这是以庞大资金集 20 年的研究成果而创造的超精密车床。

大量生产的中小型超精密零件大多是感光鼓，磁盘，多面镜，以及平面，球面或非球面的激光反射镜等。材料多为铜，铝及其合金，非电解镀镍层，进而扩展至塑料及硬脆材料(如陶瓷)，间或有铁氧体材料加工。最近也有用 CBN 精车黑色金属的报道。

这些零件的加工精度可用表 1-2 说明。

这些精密零件都是大量生产的。以磁盘为例，日本磁盘在世界市场的占有率：1984年17%，286万片；1985年24%，579万片；1987年44%，1442万片，预计1988年可达到49%的1741万片。

表 1-2 中小型精密零件的加工精度

加工零件例	平均加工精度
激光光学零件	表面粗糙度 R_a0.01～0.006μm 形状精度 0.1μm
磁　头	表面粗糙度 R_{max}0.02μm 平面度 0.04μm，尺寸精度±2.5μm
多面镜	表面粗糙度 R_{max}0.01～0.02μm 反射率 85%～90% 平面度 0.04μm，λ/5～λ/10
磁　盘	表面粗糙度 R_a0.01～0.004μm 波度 0.02～0.01mm
塑料透镜用非球面模具	表面粗糙度 R_{max}0.01μm 形状精度 1～0.3μm

日本1975年以前，超精密金刚石车床都是从欧美等国的Symon—Bryani，Philips，Moore公司进口的。但日本从1980年以后逐渐采用自己生产的超精密金刚石车床，后来居上，水平较高。现在日本生产超精密机床的工厂约有20家，如东芝公司，理研制钢公司，丰田工机，不二越，日立精机等。日本偏重发展中小型超精密机床，加工对象是电子产品，激光、录像、办公自动化设备等民用产品。为了适应大量生产的要求，降低成本提高生产率，设计和生产了专用的高生产率的超精密机床，如磁盘车床，多面镜加工机床，录像机磁鼓车床等。

再如磁带录像机(VTR)，1985年达到顶峰3300万台，日本占有60%。VTR的磁鼓也是大量生产的，其精度影响成像质量，因而要不断提高质量。

超精密切削加工是一项内容广泛的新技术，它的加工精度和表面质量是由所使用的超精密机床设备，金刚石刀具，切削加工工艺，计量和误差补偿技术、操作者的技术水平，环境支持条件等多种因素影响的综合结果，下面对其中几个主要方面的情况予以说明。

二、超精密切削的机床设备

超精密机床是实现超精密切削的首要条件，各国都投入大量人力物力研制超精密切削用机床。目前水平最高的是美国。其代表作是LLL实验室1983年研制成功的DTM—3型大型超精密车床，和1984年研制成功的大型光学金刚石车床LODTM，可分别加工ϕ2100mm，质量4500kg和ϕ1625mm，质量1360kg的工件。该机床采用空气轴承主轴和高压液体静压主轴，刚度高，动态性能好。为实现超精密位置的确定，采用了精密数字伺服方式，控制部分为内装式CNC装置和激光干涉测长仪，实现随机测量定位。为了实现刀具的微量进给，在DC伺服机构内装有压电式微位移机构，可实现nm级微位移。该车床采用了恒温油淋浴系统，油温控制在20±0.0005℃，消除了加工中的热变形。该车床还采用了压电晶体误差补偿技术，使加工精度达到0.025μm，该机床可用于加工平面，球面及非球面，用于加工激光核聚变工程的零件，红外线装置用零件以及大型天体望远镜。

在欧州以具有研究开发超精密金刚石切削加工机械传统的Philips公司的中央研究所为中心，研究开发CNC超精密金刚石车床COLATH，1978年以后用于本公司的高精度零件的加工。

英国Cranfield公司与British Science and Engineering Research Council(SERC)签订合同，研制开发X射线天体望远镜用大型超精密机床OAGM2500，机床于1991研制成功，工作台2500mm×2500mm，可用于超精密车削、磨削和坐标测量，使用性能良好。

日本大型超精密金刚石切削机床的研究与开发，远远落后于欧美，至今未见有关的报道。日本有关方面正大声疾呼在这方面积极赶超欧美。

我国机床研究所最早研制成功加工球面的超精密车床，沈阳、上海、济南等地也都有超精密车床产品，但和国外比还有差距。非球面超精密车床虽已研制出样品，还不能正式生产，空气主轴、微位移机构、精密 CNC 伺服系统、机床热变形和结构稳定性等关键技术需要研究。我国还不能生产高质量的超精密数控金刚石车床的正式产品。

三、金刚石刀具和超精密切削机理的研究

金刚石刀具是超精密切削中的重要关键。

金刚石刀具有两个比较重要的问题：一是晶面的选择，这对刀具的使用性能有着重要的关系；再就是金刚石刀具的研磨质量——刃口半径 ρ，它关系到切削变形和最小切削厚度，因而影响加工表面质量。

金刚石晶体是各向异性，用于制造刀具需要晶体定向。

超精密切削中，刀刃的实际切削厚度与名义切削厚度不相同，有一个差值。实际切削厚度亦称有效切削厚度。切削厚度，小过一定界限就不能正常切削。能稳定切削的最小有效切削厚度称为最小切削厚度。最小切削厚度取决于金刚石刀具的刃口半径，刃口半径越小，则最小切削厚度越小。国外报道研磨质量最好的金刚石刀具，刃口半径可以小到数纳米的水平；而国内现在磨的金刚石刀具，刃口半径只能达到 0.1～0.3μm。提高金刚石刀具的质量，使刃口半径小于 0.1μm 是一个我们需要研究解决的问题。目前刀具刃口半径测量用 SEM，但刃口半径<0.01μm 时，测量就是一个难题。1986 年 2 月日本精机学会与有关的企业团体设置研究规划："超精密金刚石切削加工用刀具刀刃评价的研究"。最近日本大阪大学和美国 LLL 实验室合作研究超精密切削的最小极限，成功地实现了 1nm 级切削厚度的稳定切削，使超精密切削达到新的水平。

超精密切削机理的某些方面，如各种因素对金刚石刀具磨损的影响，最小切削厚度，积屑瘤的生存规律等有一定的特殊性，过去研究较少，研究这些问题对提高切削加工表面质量，减少变质层和减少表面残留应力等有直接影响。最近黑色金属的超精密切削正在研究，有用金刚石刀具的，也有用 CBN 刀具的，目前还在实验室研究阶段。

工件材料对超精密切削有重要影响。其主要原因有：1)表面出现不纯物，造成不规则的空穴和划伤；2)结晶的晶界出现阶梯；3)加工工件有残留变形和残留应力；4)对金刚石刀具的亲合性，产生粘接现象等。为解决这些问题，可以采用高纯度合金元素(例如 99.99%Al 等)在高真空中熔解铸造，用极高速度使铸件冷却，在高于再结晶温度进行长时间保温等。

四、检测和误差补偿

要达到亚微米级和纳米级的加工精度，检测是一个极为重要的方面。超精密加工对测量技术提出了严格要求。超精密加工要求测量精度比加工精度高一个数量级。如果超精密加工精度达到 1nm，测量机要控制的精度则要达到 0.1nm。因此，超精密加工需要与相应的测量技术配合。超精密测量技术的开发必须与超精密加工技术的开发保持同步。目前超精密测量仪正向高分辨率，高精度和高可靠性的方向发展。国外广泛发展非接触式测量方法并研究原子级精度的测量技术。例如，Johaness 公司生产的多次光波干涉显微镜的分辨率为 0.5nm，Orien-Pass 公司生产的 MBI 重复反射干涉仪的测量精度可达±0.001nm。最近出现的隧道扫描显微镜的分辨率为 0.01nm，是目前世界上精度最高的测量仪，可用于测量金属和半导体零件表面的原子分布的形貌。最新的研究证实，在扫描隧道显微镜下可移动原子，实现精密工程的最终目标——原子级精密加工。

超精密加工中的测量，应包括机床超精密部件运动精度的检测和加工精度的直接检测。要提高机床的运动精度，首先要能检测出运动误差。用三点法所测得的高精度静压空气轴承的径向圆跳动一般为 50nm 左右。主轴的跳动加上静压工作台的直线运动误差，可以造成圆度和圆柱度等误差达数十纳米。

加工时机床的定位精度是一个重要问题。一般平面、圆柱表面、球表面、多面棱体加工时，工作台的运动精度相对地并不很高。但在加工非球面时就要求很高的连续的运动精度和定位精度。现在采用激光干涉测长仪精确测出工作台的位置，用反馈和闭环控制系统而制成精密 CNC 机床。

超精密加工中的误差补偿问题国内外学者专家的争议比较大。但从目前发展趋势看，要达到最高精度还需要使用在线检测和误差补偿。例如高精度静压空气轴承的径向圆跳动大约在 50nm 左右，工作台的直线运动误差也在数十纳米，要进一步实现更高精度就有一定困难。但用误差补偿可以达到 10nm 以下。

目前世界上精度最高的 LLL 实验室的 3 号超精密金刚石车床和大型光学金刚石车床 LODTM 是有误差补偿系统的，CNC 超精密机床实际上也是反馈补偿原理的体现，用激光干涉测长仪测出工作台实际位置，反馈而控制其运动。

五、超稳定的加工环境条件

加工环境条件的极微小变化都可能影响加工精度，使超精密加工达不到预期目的，因此，超精密加工必须在超稳定的加工环境条件下进行。超稳定环境条件主要是指恒温、防振、超净和恒湿四个方面的条件，相应地发展起恒温技术、防振技术和净化技术。

超精密加工必须在严密的恒温条件下进行，即不仅放置机床的房间应保持恒温，还要对机床采取特殊的恒温措施。据统计在精密加工中，由热变形产生的误差常占全部加工误差的 50% 以上，例如长 100mm 的钢件，温度升高 1℃，其长度将增加 1～1.2μm，铝件的长度将增加 2.2～2.3μm。因此超精密加工和测量必须在恒温条件下进行。如要保证 0.1～0.01μm 的加工精度，温度变化应小于 ±0.1～0.01℃。有些超精密机床，内部易产生热变形处用恒温油冷却，还有超精密机床外面加透明塑料罩，用恒温油浇淋。现在恒温油可控制在 20±0.0005℃，室温可控制在 20±0.005℃。

为了提高超精密加工系统的动态稳定性，除了在机床设计和制造上采取各种措施之外，还必须用隔振系统来保证机床不受或少受外界振动的影响。超精密车床一般除用防振沟和很大的地基外，还都使用空气弹簧隔振。美国 LLL 实验室的大型超精密金刚石车床采用隔振措施后，轴承部件的相对振动振幅为 2nm，并可防止 1.5～2Hz 的外界振动传入。

超精密加工还必须有超净化的环境。对超精密加工车间一立方英尺的空气中直径大于 0.3μm 以上的尘埃数应小于 10^2（百级）。现在又提出 10 级的要求，尘埃粒度从 0.3μm 减至 0.1μm。为建立 0.1μm 的 10 级洁净室，国外已研制成功对 0.1μm 的尘粒有 99.999% 净化效率的高效过滤器。

第三节 超精密加工技术发展展望

我们先分析一下欧美在发展超精密加工技术上的规划，它们是和宇航、天文、军事、核能等方面联系的。超精密加工的尖端部分负担着支承最新科学技术进步的重任，所以不把分散在各

个领域中的技术成就集结起来，把加工精度提高1～2个数量级是不成的。为此需要在国家的科学研究规划中投入大量的资金和人力。

探测宇宙的哈勃空间计划使用的哈勃空间望远镜HST(Hubble Space Telescope)，其一次镜为ϕ2400mm(94in)，900kg的大型镜，可以观测从波长为0.1μm的紫外线到波长为10μm的红外线的波长范围。为了在地面上获得0.1角秒的高分辨率(相当于在4000km距离分辨汽车两侧的照明灯)，要求达到形状精度0.01μm，紫外线波长$\lambda/3$。现在开发了硬脆材料(玻璃)的六轴CNC抛光机。此外在LLL进行的核聚变炉NOVA计划，也需要对大直径的光学零件进行超精密加工，该计划投资450亿美元，使用100kJ玻璃激光技术。

NOVA计划中使用的1000个以上的主要光学零件中，最大的是ϕ1200mm，380kg，加工精度$\lambda/10(\lambda=633\text{nm})$，耐能量强度1ns脉冲$3\times10^{9}\text{W/cm}^{2}$。

值得注意的是，用于频率可变矩阵的KDP晶体，是由Cleveland CrystaIs公司和Pneumo Precision公司共同开发的金刚石刀具切削机床来加工，能控制KDP晶体的结晶方向进行切削。

从以上的资料来看，在美国的国家科研计划中超精密加工的研究，在材料方面从传统的铝铜扩展到难切削材料和非金属硬脆材料，从加工方式上看，从切削扩展到开发带有检测反馈的超精密技术以及最终表面涂层处理的综合的研究。

从日本发表的资料来看，日本通产省1987年开始的“超尖端加工系统的研究开发”大型研究规划提出了超精密加工发展设想。超精密加工方面主要是两大方面：一是高密度高能量的粒子束加工的研究和开发；另一方面以三维曲面加工为主的高性能的超精密机械加工技术以及作为配套的三维超精密检测技术和加工环境的控制技术。

根据我国的当前实际情况，参考国外的发展趋势，我国应开展超精密加工技术基础的研究，其主要内容包括以下四个方面：

1) 超精密切削磨削的基本理论和工艺；
2) 超精密设备的精度，动特性和热稳定性；
3) 超精密加工精度检测及在线检测和误差补偿；
4) 超精密加工的环境条件；
5) 超精密加工的材料。

“今后的制造技术基础在于超精密加工技术的完成”。这是美国军方人士的总结。参考国外精密加工技术的经验和我国实际情况，如果能对精密和超精密加工技术给予足够的重视，投入相当的人力物力进行研究，开发，在八五期间生产中稳定微米级加工技术的基础上，开始亚微米加工；九五期间在生产中稳定亚微米级加工并开始纳米级加工的试验研究。即在15～20年内达到美国等先进国家目前的水平，并在某些主要单项技术上达到国际先进水平。

复习思考题

1-1 试述精密和超精密加工技术对发展国防和尖端技术的重要意义。

1-2 从机械制造技术发展看，过去和现在达到怎样的精度可被称为精密和超精密加工？

1-3 精密和超精密加工现在包括哪些领域？

1-4 试展望精密和超精密加工技术的发展。

1-5 我国的精密和超精密加工技术和发达国家相比情况如何？

1-6 我国要发展精密和超精密加工技术，应重点发展哪些方面内容？

第二章　超精密切削与金刚石刀具

超精密切削是60年代发展起来的新技术，它在国防和尖端技术的发展中起着重要的作用。现在超精密切削是使用精密的单晶天然金刚石刀具加工有色金属和非金属，可以直接切出超光滑的加工表面。由于超精密切削可以代替研磨等很费工的手工精加工工序，不仅节省工时，同时提高加工精度和加工表面质量，近年来受到各国的重视和发展。

用金刚石刀具进行超精密切削，用于加工铝合金，无氧铜，黄铜，非电解镍等有色金属和某些非金属材料。在符合条件的机床和环境条件下，可以得到超光滑表面，表面粗糙度R_a0.02～0.005μm，精度<0.01μm。现在用于加工陀螺仪，激光反射镜，天文望远镜的反射镜，红外反射镜和红外透镜，雷达的波导管内腔，计算机磁盘，激光打印机的多面棱镜，录像机的磁头，复印机的硒鼓，菲尼尔透镜等。现在使用的面日益扩大，不仅有为国防尖端技术服务的单件小批生产方式，而且有为民用产品服务的大批量生产的方式。因此研究提高超精密切削的加工效率和加工表面质量，研究超精密切削的切削机理，已日益受到人们的重视。

超精密切削也是金属切削的一种，它当然也服从金属切削的普遍规律，它同时也有不少特殊规律。这是由金刚石刀具的特殊物理化学性能和切削层极薄等因素造成的。我们在这里将研究超精密切削的一些主要的特殊切削规律。

第一节　超精密切削的切削速度选择

超精密切削时使用天然单晶金刚石刀具，切削刃可磨得极锋利。金刚石的硬度极高，是我们所知道的材料中硬度最高的物质。它耐磨性好，热传导系数高，和有色金属间的摩擦系数低，因此切削温度低，在加工有色金属时刀具耐用度甚高，可以使用很高的切削速度（1000～2000m/min）而刀具可以长期切削磨损甚小。切削速度的高低对金刚石刀具的磨损大小影响甚微。

超精密切削要求得到超光滑的加工表面和高的加工精度，这要求刀具有高的尺寸耐用度，刀具是否已磨损，将以加工表面质量是否下降超差为依据。金刚石刀具的尺寸耐用度甚高，高速切削时刀具磨损亦甚慢。因此超精密切削时，切削速度并不受刀具耐用度的制约，这点是和普通的切削规律不同的。

超精密切削实际选择的切削速度，经常是根据所使用的超精密机床的动特性和切削系统的动特性选取，即选择振动最小的转速。因为在该转速时表面粗糙度最小，加工质量最高。获得高质量的加工表面是超精密切削的首要问题。使用质量好，特别是动特性好，振动小的超精密机床可以使用高的切削速度，可以提高加工的效率。

例如在批量生产计算机磁盘时，因产量大，要求高效率，如切5英寸磁盘（铝合金）采用3000r/min，而在单件小批生产一般只用每分数百转的切削速度。例如沈阳第一机床厂生产的SI-255液体静压主轴的超精密车床在700～800r/min时振动最大。因此用这机床进行超精密切削时，要避开该转速范围，用高于或低于该转速切削，均可得到较好的加工表面质量。在

加工批量小时可选低转速；在批量大要求生产率高时提高转速。

第二节　超精密切削时刀具的磨损和耐用度

用天然单晶金刚石刀具对有色金属进行超精密切削，如切削条件正常，刀具无意外损伤，刀具磨损甚慢，刀具耐用度极高。

天然单晶金刚石刀具用于超精密切削，破损或磨损而不能继续使用的标志为加工表面粗糙度超过规定值。金刚石刀具的耐用度平时以其切削路径的长度计。如切削条件正常，金刚石刀具的耐用度可达数百公里。

图 2-1 为美国 LLL 实验室进行的刀具磨损试验的结果，其中图 2-1a 为切最初 300m 时的加工表面粗糙度，图 2-1b 为切 20km 时的表面粗糙度。可以看到，在切削长度超过 20km 后，加工表面粗糙度 R_a 仍在 0.01μm 以内，刀具仍能继续使用。由于刀具的磨损甚少，故同一刀具可以加工很多零件，零件的尺寸一致，基本不受刀具磨损的影响。

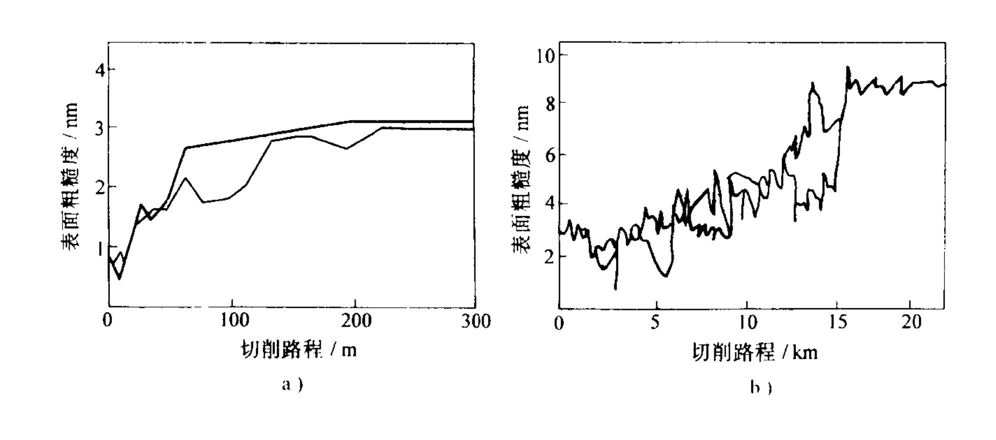


图 2-1　金刚石刀具的磨损试验　加工材料：非电解镍

a）切最初 300m 时　b）切 20km 时

实际使用中金刚石刀具常达不到上述的耐用度，常常是由于切削刃产生微小崩刃而不能继续使用，这主要是由于切削时的振动或刀刃的碰撞引起的。应注意天然单晶金刚石刀具只能用在机床主轴转动非常平稳的高精度机床上，否则由于振动金刚石刀具将会很快产生刀刃微观崩刃，不能继续使用。金刚石刀具要求使用维护极为小心，不允许在有振动的机床上使用。在刀具设计时应正确选择金刚石晶体方向，以保证刀刃有较高强度。

图 2-2 为金刚石刀具磨损区概貌。一般到加工表面粗糙度改变时，刀具磨损仍甚小，刀刃的正常磨损情况，如图 2-3a 所示。图 2-3b 中为剧烈磨损情况。从图中可看到磨损后成层状，即刀具磨损为层状微小剥落，这大概是由于金刚石沿（111）晶面有解理现象产生而造成这样的磨损形式。图 2-4 中是金刚石切削钢和镍时的磨损形式，沿切削速度方向出现磨损沟槽，这是由于金刚石和铁、镍的化学和物理亲和性而产生的腐蚀沟槽。图 2-5 为刀刃产生微小崩刃时情况，在金刚石刀具切削时，如有微小振动，就会产生刀刃微小崩刃。

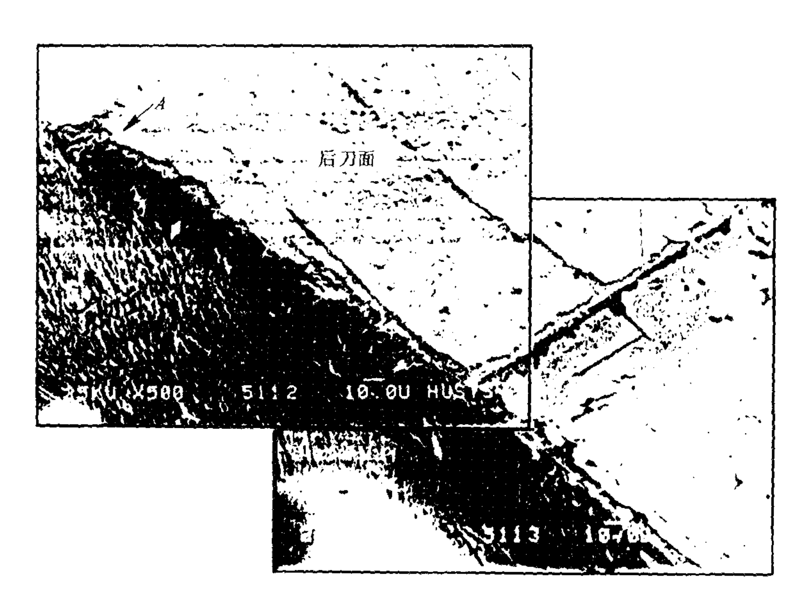
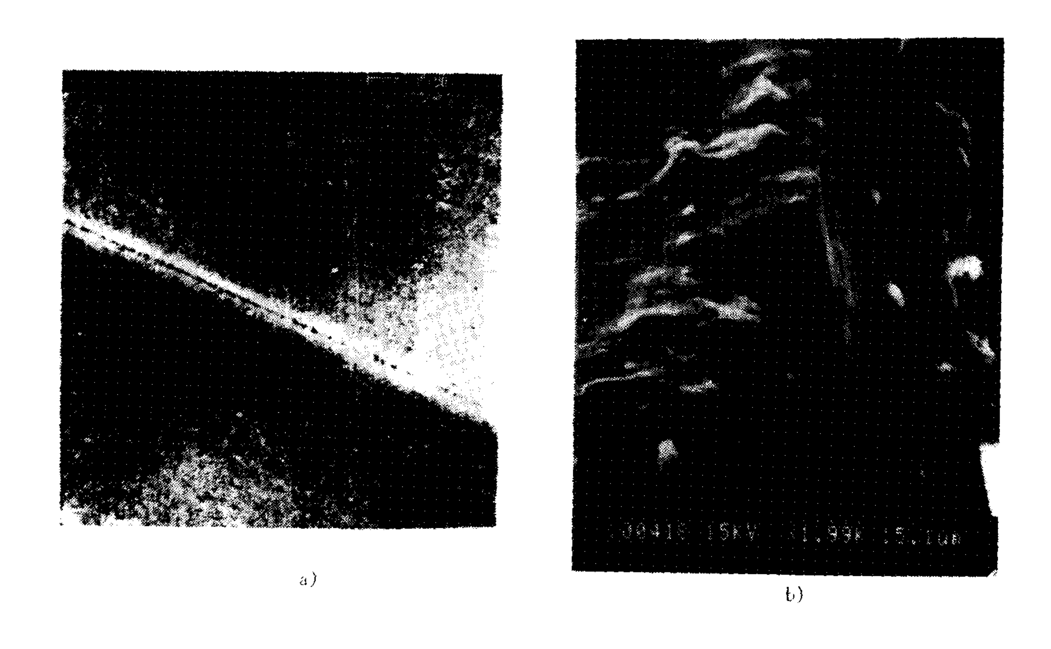


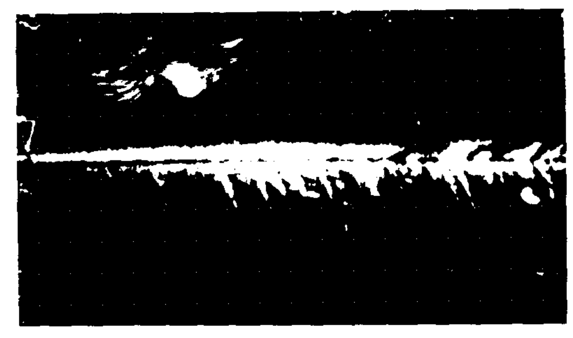
图 2-2 单晶金刚石车刀磨损区概貌



a)

b)

图 2-3 金刚石刀具的磨损情况



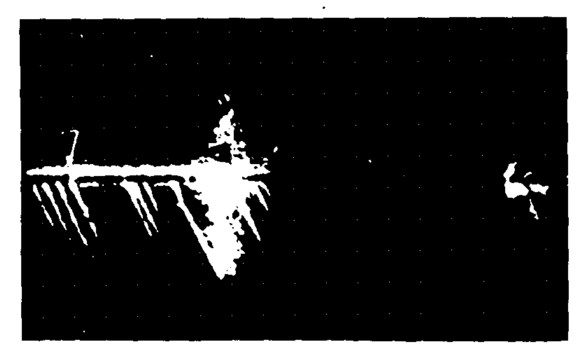


图 2-4　切非电解镍时刀具磨损情况

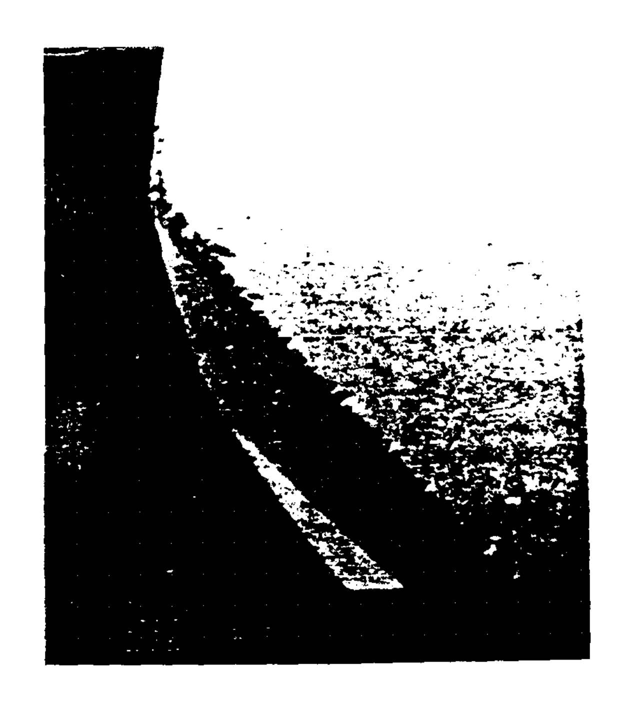


图 2-5　刀刃产生微小崩刃

第三节　超精密切削时积屑瘤的生成规律

积屑瘤的产生对加工表面质量影响极大，因此积屑瘤的生成规律和减小积屑瘤的办法是超精密切削中必须研究的重要问题。

一、超精密切削时切削参数对积屑瘤生成的影响

有人做过实验，用金刚石刀具精密切削有色金属，不用切削液，在所有进行实验的切削参数下都产生积屑瘤。实验结果如下：

1. 切削速度对积屑瘤产生的影响

图 2-6 为金刚石刀具精切硬铝 LY12 时，不同切削速度时的积屑瘤的照片。实验中的积屑瘤都牢固的粘在刀尖上，不能被冲洗掉。积屑瘤一般都很小，用肉眼和对刀显微镜有时难以看清，需用倍数较大的显微镜观察。从图 2-6 中可看到在所有速度范围内，包含很高的切削速度（$v=816\text{m/min}$）都有积屑瘤产生，但切削速度变化将影响积屑瘤的高度。从图 2-7 可看到当切削速度较低时，积屑瘤高度 h_0 最高，而当切削速度大于 $v=314\text{m/min}$ 时，积屑瘤趋于稳定，高度变化不大。这说明在低速切削时，切削温度比较低，较适于积屑瘤生长，且在低速时 h_0 值比较稳定。在高速时 h_0 值不稳定。特别是切黄铜和紫铜，积屑瘤不稳定且比较小，高度 h_0 在 0.1～0.75μm。

刀刃的微观缺陷直接影响积屑瘤的高度。在某相同的切削条件下，完整刃的积屑瘤高度为 5μm，而有微小崩刃的刀刃积屑瘤高度为 18μm。

2. 进给量 f 和背吃刀量 a_p 对积屑瘤生成的影响

图 2-8 给出了不同进给量对积屑瘤高度 h_0 的影响，图 2-9 给出了背吃刀量 a_p 对积屑瘤高度的影响。在实验的切削参数范围内都有积屑瘤产生。

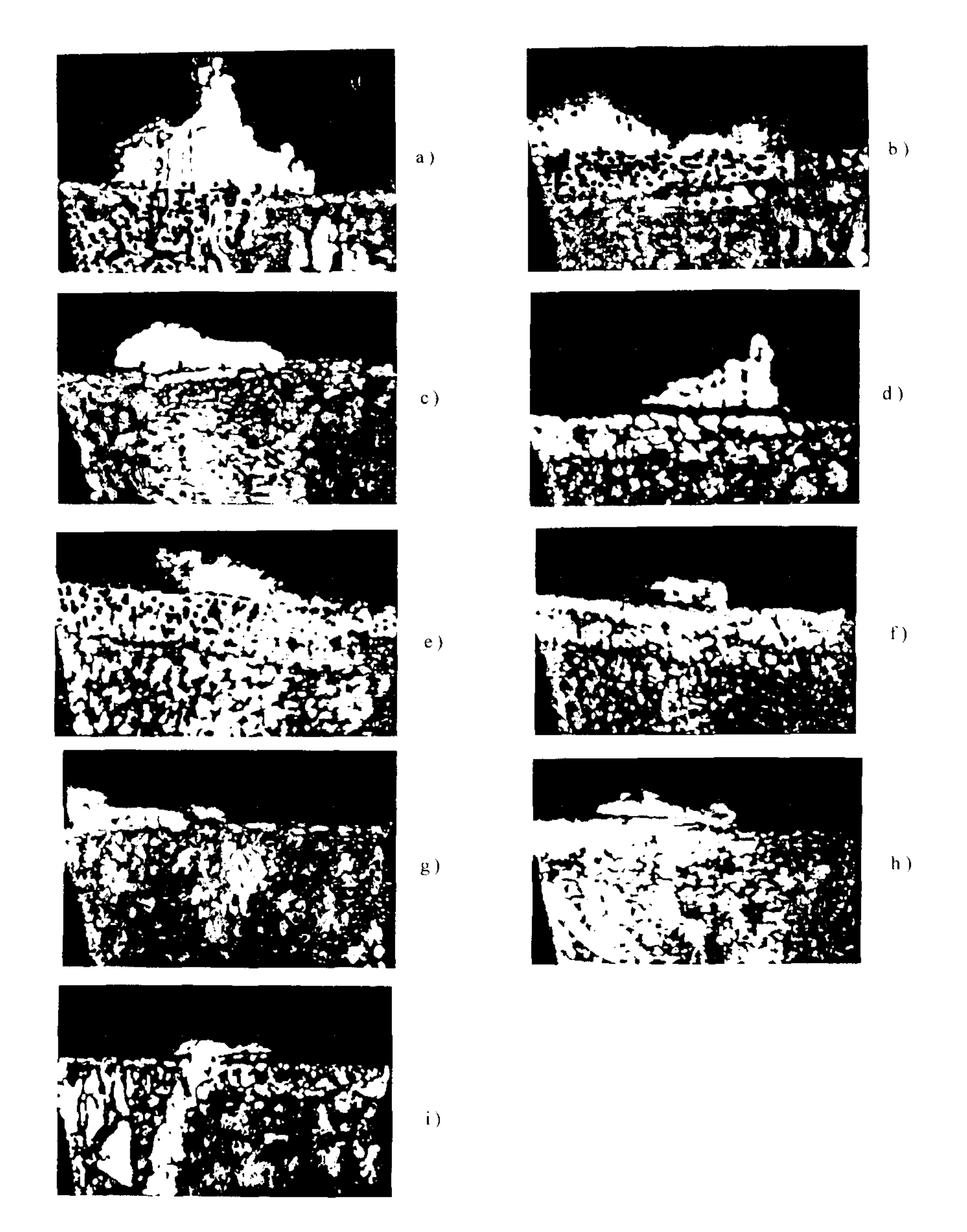


图 2-6 积屑瘤照片（所有照片放大倍数为 600 倍）

a）$v=12$ b）$v=62$ c）$v=120$ d）$v=204$ e）$v=311$ f）$v=416$

g）$v=531$ h）$v=653$ i）$v=816$ 单位为 m/min

从图 2-8 可看到在进给量很小时，积屑瘤的高度 h_0 较大，在 $f=5\mu m/r$ 时 h_0 值最小，f 值再增大时，h_0 值稍有增加，这变化大概是由于切削温度变化所引起的。

从图 2-9 可看到在背吃刀量 $a_p<25\mu m$ 时，积屑瘤的高度变化不大，但在 a_p 大于 $25\mu m$ 后，积屑瘤高度将随 a_p 值的增加而增加，这变化的原因大概是由于切削温度变化和积屑瘤底部粘附面积的变化所造成的。

二、超精密切削时积屑瘤对切削力和加工表面粗糙度的影响

1．积屑瘤对切削力的影响

在超精加工中，切削力的测量和分析是一个重要问题。实验证明超精切削时切削力的变化规律和普通切削是有区别的，搞清这些问题有助于揭示超精切削的加工机理。

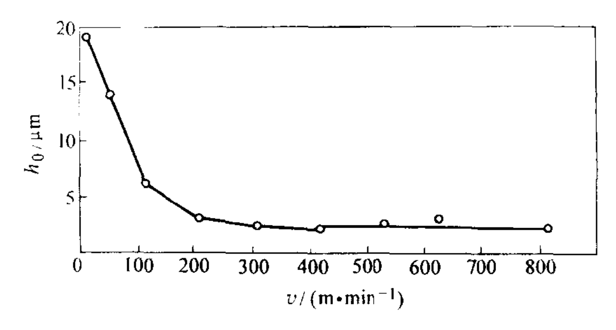


图 2-7　超精密切削时切削速度对积屑瘤高度的影响

工件硬铝　$f=0.0075mm/r$　$a_p=0.02mm$

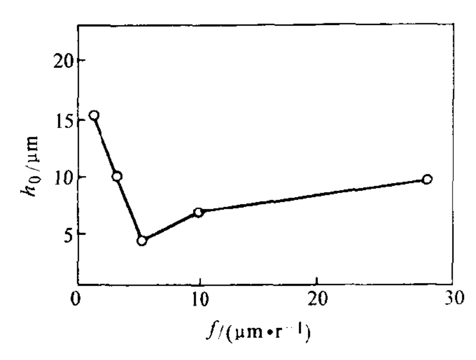


图 2-8　进给量 f 对积屑瘤高度的影响

硬铝　$v=314m/min$　$a_p=0.02mm$

图 2-10 所示是超精切削时切削力和切削速度的关系曲线。可看到超精密切削铝合金和紫铜时，低速时切削力大，随切削速度增加，切削力急剧下降。到 200～300m/min 后，切削力基本保持不变，这规律和图 2-7 中的积屑瘤高度 h_0 随切削速度的变化规律一致。即积屑瘤高时切削力大，积屑瘤小时切削力也小，和普通切削切钢时的规律正好相反。普通切削切钢时，积屑瘤可增加刀具的实际前角，故积屑瘤增大可使切削力下降，但超精切削时切削力增大。现分析其原因如下：

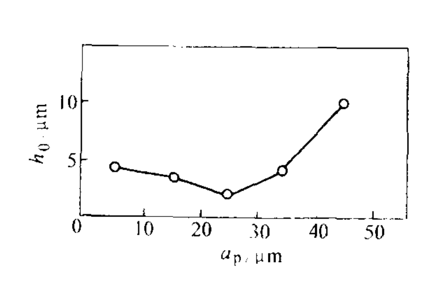


图 2-9　背吃刀量[⊖] a_p 对积屑瘤高度的影响

硬铝　$v=314m/min$　$f=0.0075mm/r$

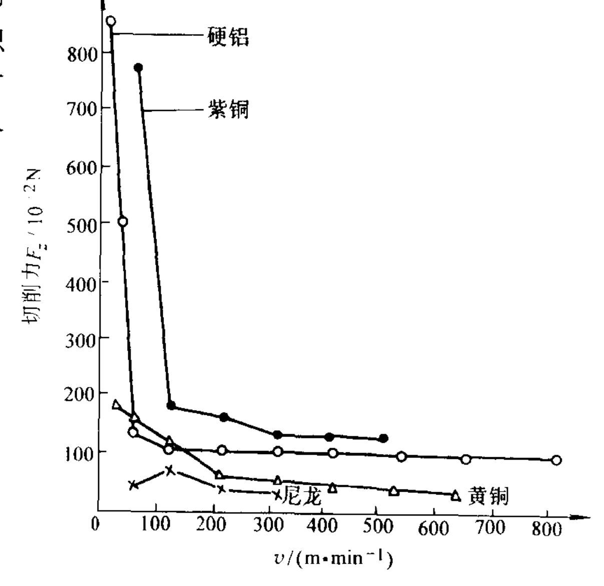


图 2-10　超精切削时的切削力

$f=0.0075mm/r$　$a_p=0.02mm$

从实际金相显微观察，超精切削时的积屑瘤都呈鼻形，凸出在刀刃前，顶端有一个圆弧半径 R，这鼻形积屑瘤代替锋利的刀刃进行切削。图 2-11 所示是有积屑瘤时的超精切削的切削模型。根据此切削模型，分析积屑瘤造成切削力增加的原因如下：

1）鼻形积屑瘤前端的圆弧半径 R 大约为 2～3μm，较原来金刚石车刀的刃口半径 $\rho=0.2\sim0.3\mu m$ 大得多。由于超精切削切削层极薄，实际切削是由刃口半径 R 起作用，这将导致切削力明显增加；

⊖　根据 GB/T12204—90 称为背吃刀量，惯称为切削深度。

2）积屑瘤存在时，它代替金刚石刀刃进行切削，积屑瘤和切屑间的摩擦及积屑瘤和已加工表面之间的摩擦都很严重，摩擦力很大，大大超过金刚石和这些材料之间的摩擦力，这导致切削力的增加；

3）积屑瘤呈鼻形并自刀刃前伸出，这导致实际切削厚度超过名义值。超精密切削的切削厚度原来就甚小，增加切削厚度将使切削力明显增加。

2. 积屑瘤对加工表面粗糙度的影响

如上述，超精切削的积屑瘤呈鼻形，代替刀刃进行切削，积屑瘤和已加工表面剧烈摩擦，使表面粗糙度加大。图 2-12 为超精切削时，切削速度对加工表面粗糙度的关系。可看到这关系曲线和图 2-7 基本一致，即加工表面粗糙度是直接和积屑瘤的高度有关，即积屑瘤高度大，表面粗糙度大；积屑瘤小时加工表面粗糙度亦小。

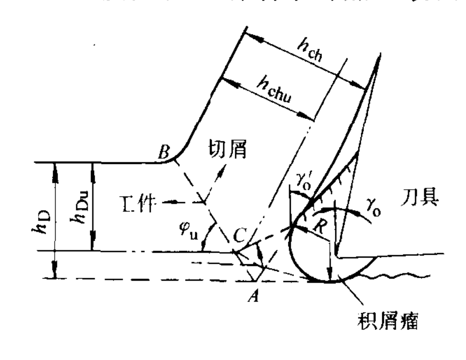


图 2-11　有积屑瘤时的超精切削的切削模型

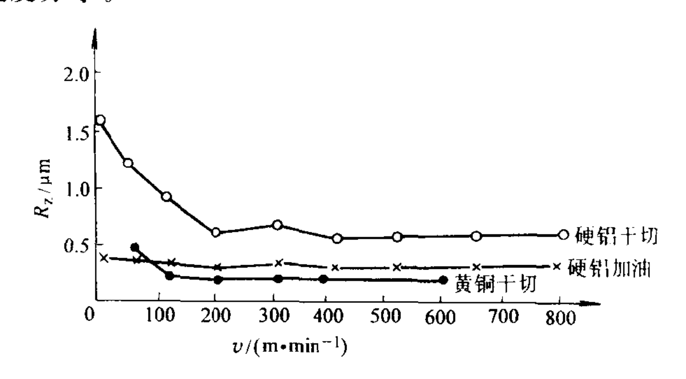


图 2-12　超精切削时切削速度对加工表面粗糙度的影响
$f=0.0075mm/r$　$a_p=0.02mm$

三、使用切削液减小积屑瘤，减小加工表面粗糙度

从上面的分析可知，要减小加工表面粗糙度，应消除或减小积屑瘤，使用切削液可以达到上述目的。图 2-12 中可看到加工硬铝时，如加航空汽油为切削液，可明显减小加工表面粗糙度，并且在低速时表面粗糙度亦很小。这说明使用切削液后，已消除了积屑瘤对加工表面粗糙度的影响，这时切削速度已和加工表面粗糙度无关，这情况是和普通切削时切钢的规律不同。加工黄铜时，切削液无明显效果，低速时加工表面粗糙度不大，故加工黄铜可使用也可不使用切削液。

第四节　切削参数变化对加工表面质量的影响

一、切削速度的影响

切削速度变化将影响切削变形，将影响加工表面的粗糙度和变质层，但在常用的超精密切削速度范围内对加工表面粗糙度的影响并不显著。

这里讨论切削速度对加工表面粗糙度的影响时，只考虑使用切削液的情况。实际生产中加工铝合金、紫铜都使用切削液以消除积屑瘤的影响；加工黄铜时可使用亦可不使用切削液，故讨论研究切削速度对加工表面粗糙度影响时，应符合实际生产使用的条件。图 2-12 已经给出了一组切削速度变化对加工表面粗糙度影响关系的实验结果，可以看到有切削液的条件下切削速度对加工表面粗糙度的影响甚微。表 2-1 是另一组实验结果的数据。

表 2-1　金刚石刀具切削时切削速度对加工表面粗糙度的影响

试 件 材 料	切削速度/（m・min⁻¹）						
	105	220	325	450	565	680	775
	$R_z/\mu m$						
黄铜（无切削液）	1.48	1.48	1.34	1.44	1.44	1.44	1.5
铝合金（酒精）	1.44	1.42	1.44	1.44	1.46	1.46	1.49

从上述实验结果可知，切削速度对加工表面粗糙度基本无影响，表 2-1 中表面粗糙度略有变化，主要是受机床动特性的影响。在刀具、机床、环境条件都符合条件时，从极低到很高切削速度，都能够得到粗糙度极小的加工表面（$R_a<0.01\mu m$）。图 2-13 中是实验得到的结果，在进给量 $f=2.5\mu m/r$，背吃刀量 $a_p=2\mu m$ 时，不同切削速度均得到表面粗糙度极小的加工表面——镜面。这结果极为重要，因为超精密切削常用在车端面，如车计算机磁盘，加工平面和曲面的反射镜等，这些零件的表面都严格要求自外面到中心，都是粗糙度值极小的超光滑表面——镜面。

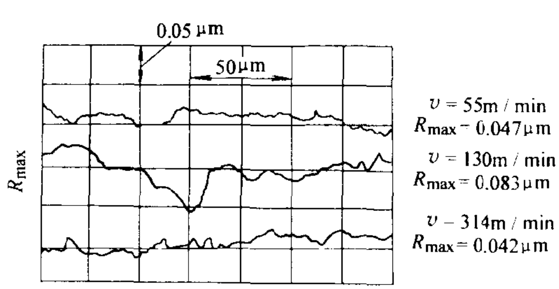


图 2-13　切削速度对加工表面粗糙度的影响

$f=2.5\mu m/r$　$a_p=2\mu m$、加工材料硬铝 LY12

二、进给量和修光刃对加工表面粗糙度的影响

为使加工表面粗糙度值减小，超精切削都采用很小的进给量，刀具制成带修光刃的。

表 2-2 中是不同进给量时的表面粗糙度，可看到在使用有修光刃的刀具时，$f<0.02mm/r$ 时，进给量再减小对表面粗糙度影响不大。

图 2-14 是在超精密切削条件下，变化进给量得到的加工表面粗糙度实验结果。实验中使用圆弧切削刃刀具。可看到在进给量 $f<5\mu m/r$ 时，均达到 $R_{max}<0.05\mu m$ 的镜面。

表 2-2　进给量对加工表面粗糙度的影响

试件材料	进给量 f/mm・r⁻¹			
	0.005	0.01	0.015	0.02
	粗糙度 $R_z/\mu m$			
黄　铜	0.27	0.25	0.25	0.24
铝 合 金	0.33	0.27	0.33	0.33

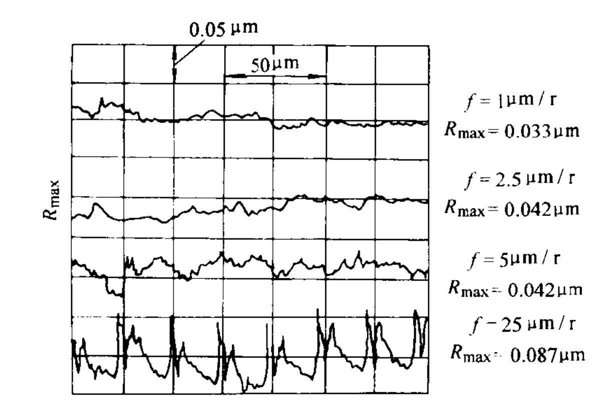
注：刀具有修光刃　$l_f=0.2mm$

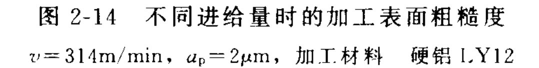
三、刀刃形状对加工表面粗糙度的影响

超精密切削时用的单晶金刚石刀具，有做成直线修光刃的，也有做成圆弧刃。直线刃刀具制造容易，国内用得较多。刀具有直线修光刃时，可减少残留面积，减小加工表面的粗糙度值。修光刃的长度常取 0.05～0.20mm。图 2-15 是修光刃长度对加工表面粗糙度的影响。从图可看到修光刃的长度过长，对提高加工表面质量效果不大。

对有修光刃的金刚石车刀，加工时要精确对刀，使修光刃和进给方向一致。生产中常使用对刀显微镜来精确对刀。

为易于对刀，有将修光刃制成曲率半径较大的圆弧刃，圆弧刃半径一般取 $R=2\sim5mm$。由于超精密切削进给量都取得很小，故用圆弧刃车刀时仍可切出高质量的超光滑表面。使用圆弧刃车刀时对刀使用方便，但刀具制造较复杂。




图 2-14　不同进给量时的加工表面粗糙度
$v=314$m/min，$a_p=2\mu$m，加工材料　硬铝 LY12

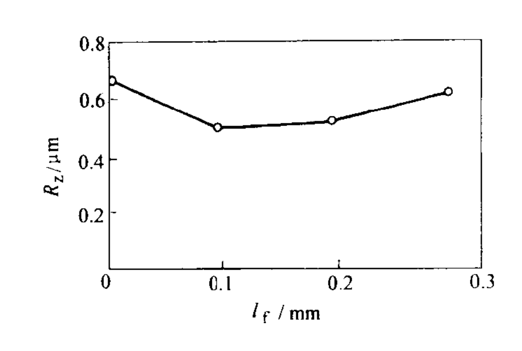


图 2-15　金刚石刀具修光刃长度对加工表面粗糙度的影响
工件材料-硬铝，$v=314$m/min，$f=10\mu$m/r，$a_p=0.02$mm

四、背吃刀量变化对加工表面粗糙度的影响

超精密切削的背吃刀量对加工表面质量（粗糙度，变质层）的影响，存在着不同的观点，表 2-3 中是有人得到的实验结果。

从这实验结果看，背吃刀量减小使加工表面粗糙度加大。经分析后发现这实验使用的刀具刃口半径 ρ 较大，故背吃刀量小时，切削困难，变质层大，造成加工表面粗糙度加大。

表 2-3　背吃刀量对表面粗糙度的影响 $v=480$m/min，$f=0.02$mm/r

试件材料	背吃刀量/mm				
	0.025	0.05	0.075	0.1	0.15
	R_z/μm				
黄铜	1.56	1.5	1.48	1.32	1.22
铝合金	2.6	2.24	1.9	1.75	1.83

经过精密研磨的单晶天然金刚石刀具，可以达到刃口半径 $\rho<0.05\sim0.1\mu$m，这时最小背吃刀量可以在 0.1μm 以下，可以得到超光滑表面，加工表面粗糙度 $R_z<0.02\mu$m，表面变质层亦极小。即在刀具刃口半径 ρ 足够小时（$\rho<0.05\sim0.1\mu$m），在超精密切削范围内，背吃刀量变化（$a_p=5\sim0.5\mu$m）实际对加工表面粗糙度影响甚小，并不会如表 2-3 那样背吃刀量减小，表面粗糙度反而增大。

图 2-16 是实验得到的结果，在 $v=314$m/min、$f=2.5\mu$m/r 的超精密切削条件下，进给量 $a_p=0.5\sim5\mu$m 时均得到极小表面粗糙度的镜面。

五、背吃刀量变化对加工表面残留应力的影响

实验中实测了不同背吃刀量时加工表面的残留应力。切削时采用 $v=314$m/min、$f=2\mu$m/r，加工材料硬铝 LY12。使用日本生产的 X 射线应力测量仪测残留应力。实验结果见图 2-17。可看到背吃刀量减少，表面残留应力亦减小，但小过某临界值时，背吃刀量减小反面使加工表面残留应力增加。这临界值的大小和刀刃锋锐度（刃口半径 ρ）有关，即刀刃锋锐时这临界值就要小些。

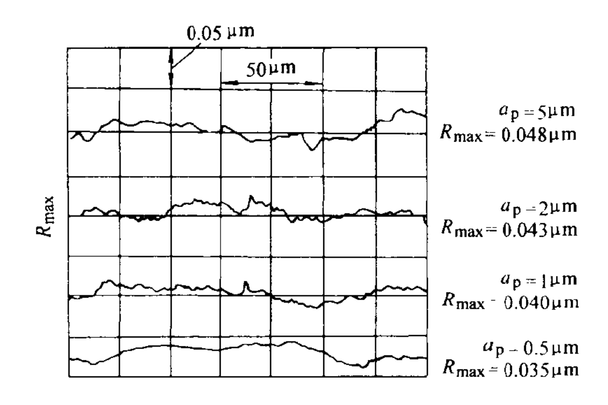


图 2-16　切削速度对加工表面粗糙度的影响
v=314m/min、f=2.5μm/r，加工材料：硬铝 LY12

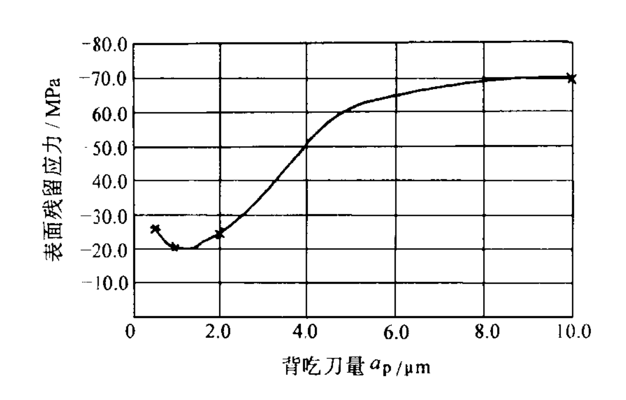


图 2-17　切削速度对加工表面残留应力的影响
v=314m/min、f=2.5μm/r，加工材料　硬铝 LY12

第五节　刀刃锋锐度对切削变形和加工表面质量的影响

大家都知道刀刃锋锐度对切削变形和加工表面质量有影响，特别是在超精密切削件下具有很重要的意义，下面是不同锋锐度金刚石刀具切削对比试验所获得的结果。

一、刀刃锋锐度的测量

金刚石刀具刀刃锋锐度的测量是一个技术难题。普通刀具的刀刃锋锐度 ρ 值可用印痕法或双筒显微镜光切法测量（ρ 值在 5～30μm)，金刚石刀具因刃口半径 ρ 值小，上述方法分辨率不够，不能使用。金刚石刀具的 ρ 值现在都采用扫描电镜测量，观察刀刃的侧投影（和刀刃垂直的投影），在放大 20000～30000 倍时测量刃口半径 ρ 值由于金刚石刀具的前后刀面都研磨得极平，扫描电镜的景深大，故用此法能测出可靠的结果。但如 $\rho<0.1$μm，则用扫描电镜测量分辨率不够，测量就有困难。金刚石刀具刃口半径的测量，用扫描电镜测量是国际上通用的方法，并且是现在主要的测量方法。

图 2-18 是试验用的金刚石车刀几何形状，两把刀完全相同，仅锋锐度有差别。这两把刀切硬铝时均有可能切出 $R_a<0.01$μm 的镜面，在进行切削实验前利用 SEM 检测了刀具刃口锋锐度，测得的刃口半径 $\rho=0.4$ 和 0.7μm。考虑到拍扫描电镜照片时刀尖经真空镀金，故实际刃口半径 ρ 应为 0.3 和 0.6μm（或略大）。

二、刃口锋锐度对加工表面粗糙度的影响

两把不同锋锐度金刚石车刀的对比试验，包括了不同背吃刀量，不同进给量和不同切削速度时的加工表面粗糙度。

1. 图 2-19 为两把刀在不同背吃刀量时的加工表面粗糙度

从实验结果可看到，刀刃锋锐度对加工表面粗糙度有明显影响：当背吃刀量 $a_p=0.5$μm 时，用刃口锋锐度 $\rho=0.3$μm 的金刚石车刀切削，可得加工表面粗糙度 $R_{max}=0.035$μm，而用 $\rho=0.6$μm 的车刀切削只能得到

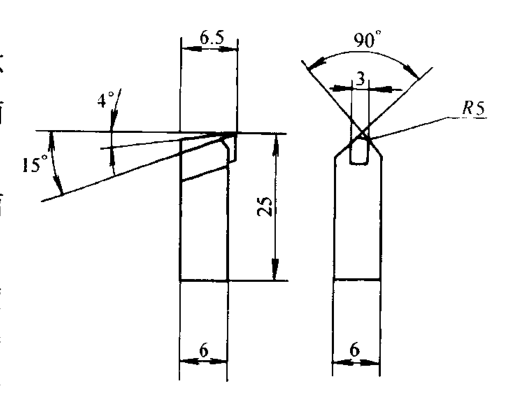


图 2-18　实验用金刚石车刀的几何形状

$R_{max}=0.060\mu m$；当 $a_p=5\mu m$ 时，用 $\rho=0.3\mu m$ 的车刀切削仍能得到 $R_{max}=0.048\mu m$，用 $\rho=0.6\mu m$ 的车刀切削只能得到 $R_{max}=0.097\mu m$，但在 $a_p=2\mu m$ 时，两者差别不大。

2. 图 2-20 所示为两把刀具在不同进给量时的加工表面粗糙度

从实验结果可看到，在不同进给量时，锋锐的金刚石车刀加工表面粗糙度值较小，差别是很明显的。

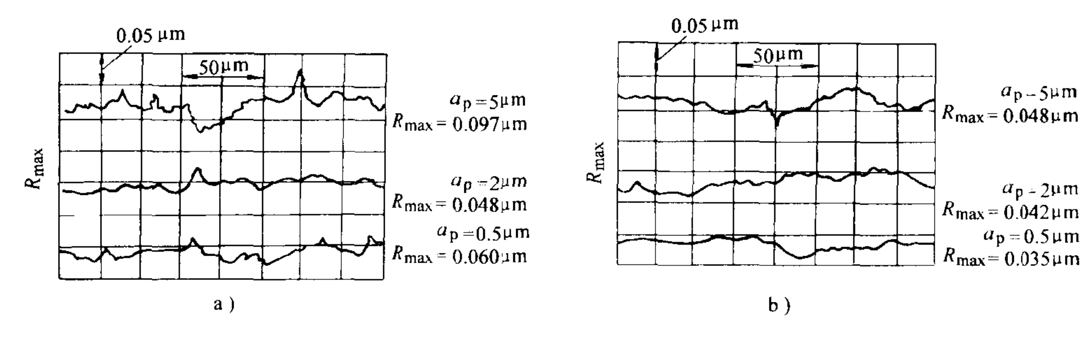


图 2-19　两把刀具在不同背吃刀量 a_p 时的加工表面粗糙度

a) $\rho=0.6\mu m$　b) $\rho=0.3\mu m$

($v=314m/min$，$f=2.5\mu m/r$)

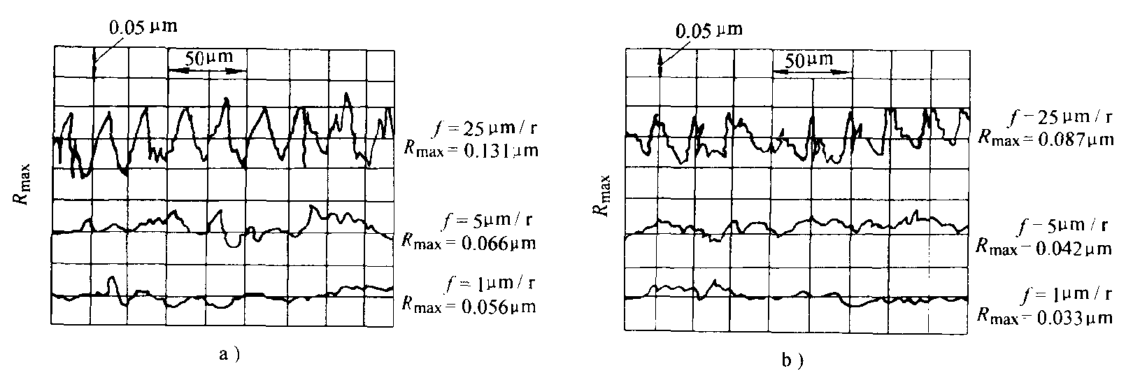


图 2-20　两把刀具在不同进给量 f 时的加工表面粗糙度

a) $\rho=0.6\mu m$　b) $\rho=0.3\mu m$

($v=314m/min$，$f=2\mu m/r$)

3. 还进行了两把刀具在不同切削速度 v 时的加工表面粗糙度试验

采用较小的背吃刀量和进给量时（$a_p=1\sim2\mu m$，$f<2.5\mu m/r$），两把刀切出的加工表面粗糙度相差不大。

从以上的实验结果可知，金刚石刀具刃口锋锐度对加工表面粗糙度是有一定影响的。例如在机床条件较好时切铝合金，用 $\rho=0.6\mu m$ 的金刚石车刀，仅在进给量和背吃刀量小的条件下（$a_p=1\sim2\mu m$，$f<2.5\mu m/r$）可切出 $R_{max}=0.056\mu m$；而更锋锐的刀具（$\rho=0.3\mu m$），可以在较宽的切削条件下切出 $R_{max}=0.056\mu m$ 的表面。

三、刀刃锋锐度对切削变形和切削力的影响

用金刚石刀具进行超精密切削，刀刃锋锐度对切削变形有着很大影响，特别是在背吃刀量和进给量较小的时候。直接测量切削变形比较困难，故通过测量切屑的变形系数、测量切削力、测量加工表面的变形程度来说明切削变形的大小。

经实测，用锋锐金刚石车刀切削时，切屑变形系数明显低于用较钝的刀具切削时的切屑变形系数。

图 2-21 是锋锐度不同的金刚石车刀切削铝合金时的切削力对比曲线，切削力是用瑞士 Kistler 压电晶体测力仪测量的。

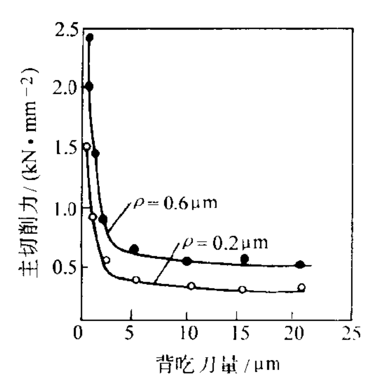


图 2-21 刀刃锋锐度对切削力的影响

$v=314$m/min，$f=5\mu$m/r

为便于分析比较，测出的主切削力折算成单位切削面积的切削力。

从图 2-22 中曲线可看到，由于刀刃锋锐度不同，切削力有明显差别。在 a_p 较小时，差别更明显。此外，还可看到在背吃刀量很小时，单位切削力急剧增大。这是因为超精密切削时，背吃刀量和进给量都很小，刃口半径 ρ 不同（$\rho=0.3\mu$m 和 0.6μm）将明显影响切削变形。ρ 值增大将使切削变形明显加大。在背吃刀量很小（如 $a_p<1\mu$m）时，刃口半径造成的附加切削变形已占总切削变形的很大比例，ρ 值的微小变化将使切削变形产生很大的变化。因此在背吃刀量很小的精切时，应采用 ρ 值很小的锋锐金刚石车刀，应予以特别注意。

四、刀刃锋锐度对切削表面层的冷硬和组织位错的影响

超精密切削时，加工表面变质层必须严加控制。变质层的厚度和变形程度与所用刀具的锋锐度直接有关。本实验中检测了加工表面变质层的显微硬度和组织位错。

1. 刀刃锋锐度对加工表面冷硬的影响

使用锋锐度不同的金刚石车刀切削铝合金 LY12，用维氏显微硬度计检测加工表面的显微硬度。

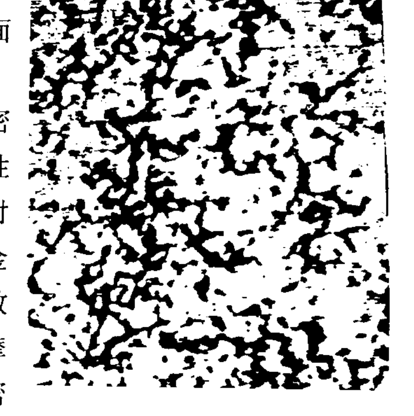
LY12 铝合金原始材料的显微硬度为 105HV。使用 $\rho=0.3\mu$m 的金刚石车刀切削，得到的加工表面显微硬度为 167HV；使用 $\rho=0.6\mu$m 的金刚石车刀切削，得到的加工表面显微硬度为 205HV。从实验结果可知：

1）金刚石刀具锋锐度不同时，加工表面变质层的冷硬和显微硬度有明显差别；

2）在金刚石刀具较锋锐的情况下（$\rho=0.3\mu$m），超精密切削的加工表面仍有较大的冷硬存在，在加工表面要求变质层很小的情况下，应努力将金刚石刀具研磨得更加锋锐，即要求 ρ 值更小。

2. 刀刃锋锐度对加工表面层位错的影响

加工表面层组织的位错密度，是加工表面的质量和工作性能的重要标志。它取决于加工时的切削变形和后面摩擦。由于金刚石和有色金属之间摩擦系数小（一般为 0.06～0.12），后面摩擦不大，故加工表面层的位错密度主要由切削变形决定。即切削变形大时，表面层的位错密度大；切削变形小，则位错密度也小。



a)



b)

图 2-22 不同锋锐度金刚石车刀切削的加工表层位错密度

a) $\rho=0.3\mu$m b) $\rho=0.6\mu$m

$v=314$m/min，$f=5\mu$m/r，$a_p=10\mu$m

用两把锋锐度不同的金刚石车刀（ρ=0.3μm 和 0.6μm）切削 LY12 铝合金，加工表面层用透射电镜（TEM）观察其组织的位错密度。图 2-22 为得到的透射电镜照片。从照片可以看到，用 ρ=0.3μm 刀具切出的加工表面层的位错密度（图 2-22a）明显低于用 ρ=0.6μm 刀具时的位错密度（图 2-22b），后者有较大量的位错团。即前者的加工表层位错密度小、切削变形小，表面质量高。

五、刀刃锋锐度对加工表面残留应力的影响

超精切削加工表面层的残留应力，也是表面质量的重要标志。它不仅影响材料的疲劳强度和耐磨性，而且影响加工零件的长期尺寸稳定性。这在精密加工中是极关重要的问题。

本实验是使用 ρ=0.3μm 和 0.6μm 的金刚石车刀切削铝合金，并用日本的 MSE-2M 型 X 射线应力仪测量加工表面层的残留应力。试件材料为 LY12 铝合金，测量结果见表 2-4。

表 2-4 不同锋锐度刀具切铝合金的加工表面残留应力

切削条件			表面残留应力/MPa	
切削速度 v (m·min^{-1})	进给量 f (μm·r^{-1})	背吃刀量 a_p μm	刀具刃口半径 ρ=0.3μm	刀具刃口半径 ρ=0.6μm
314	5	10	−67.0	−118.2
314	5	5	−42.3	−95.1
314	5	2	−28.4	−57.6
314	5	1	−20.3	−48.0
314	5	0.5	−26.0	−60.8

从实验的结果可知，在超精密切削条件下：

1）用锋锐的 ρ=0.3μm 的金刚石车刀切削时，加工表面的残留应力，要比用较钝的 ρ=0.6μm 的刀具切削时低得多；

2）背吃刀量 a_p 减小，可使残留应力减小；

3）当背吃刀量 a_p 减小到某临界值时（在本实验条件下为 a_p=1μm，这和刀刃锋锐度 ρ 值有关），再继续减小背吃刀量，却使加工表面残留应力增大。

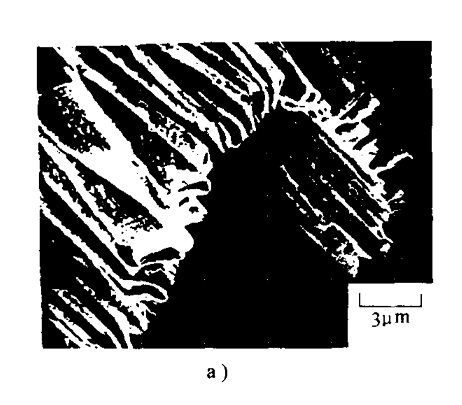
第六节 超精密切削时的最小切削厚度

超精密切削有时要求进行极微量的切除，因此，超精密切削能达到的极限最小切削厚度成为一个有研究意义的问题。

一、超精密切削实际达到的最小切削厚度

超精密切削实际能达到的最小切削厚度和金刚石刀具的锋锐度、使用的超精密机床的性能状态、切削时的环境条件等都直接有关。1986 年开始日本大阪大学和美国 LLL 实验室合作进行了一项具有时代意义的实验研究“超精密切削的极限”，这项研究取得突破性的重大成果。

这项研究结果之一证明，使用极锋锐的刀具和机床条件最佳的情况下，金刚石刀具的超精密切削，可以实现切削厚度为纳米（nm）级的连续稳定切削。图 2-23 为这项实验中用扫描电镜拍摄的一组切屑的照片，其切削厚度分别为 30nm 和 1nm。实验使用的单晶金刚石刀具是日本大阪金刚石公司特制的，切削试验的机床是 LLL 实验室的超精密金刚石车床。从 SEM 照片中可以看到在切削厚度极小时（h_{Dmin}=1nm），仍能得到连续稳定的切屑，说明切削过程是连续、稳定和正常的。



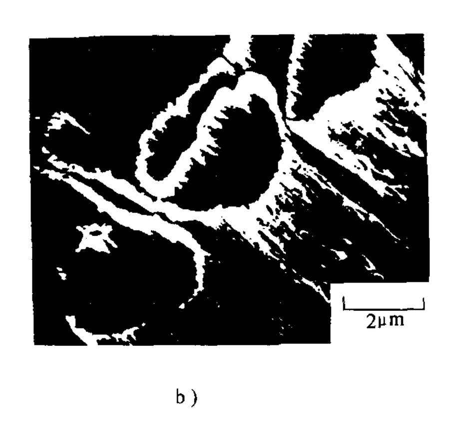


图 2-23 日本大阪大学和美国 LLL 实验室得到的切削厚度极小的切屑（SEM 照片）

a) $h_D=30\text{nm}$ b) $h_D=1\text{nm}$

二、刀刃刃口半径 ρ 和最小切削厚度的关系

超精密切削时能达到的极限最小切削厚度和金刚石刀具刀刃锋锐度（刃口半径 ρ 值）有关，和被切材料的物理力学性能有关。

图 2-24 所示，为极限最小切削厚度 h_{Dmin} 和刀刃刃口半径 ρ 的关系。可看到有极限临界点 A，A 点以上被加工材料将堆积起来形成切屑，而 A 点以下，加工材料经弹塑变形，形成加工表面，如图 2-24a 所示。

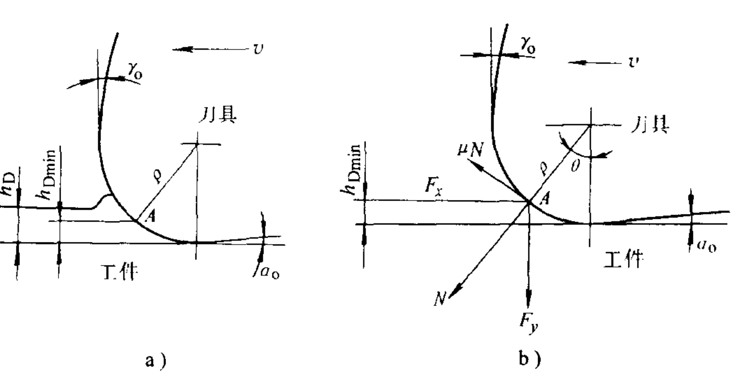


图 2-24 极限切削厚度和刃口半径 ρ 的关系

现分析临界点 A 的受力变形情况。如图 2-24b 所示，在 A 点处工件受水平力 F_x 和垂直力 F_y 作用。这两力亦可分解为 A 点处的法向力 N 和切向力 μN，则 N 力和 μN 力可用下式计算

$$N=F_y\cos\theta+F_x\sin\theta$$

$$\mu N=F_x\cos\theta-F_y\sin\theta$$

化简后得到

$$\tan\theta=\frac{F_x-\mu F_y}{\mu F_x+F_y}$$

仅在实际摩擦力 $(\mu N)'$ 大于 μN 时，被切材料和刀刃刃口圆弧无相对滑移，将随刀刃前进，形成堆积，最后形成切屑而被切除。故

$$(\mu N)'>F_x\cos\theta-F_y\sin\theta$$

现在 A 点为极限临界点，这极限最小切削厚度 $h_{D\min}$ 应为

$$h_{D\min}=\rho(1-\cos\theta)=\rho\left(1-\frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\theta}}\right)$$

化简后得到：

$$h_{D\min}=\rho\left[1-\frac{F_y+\mu F_x}{\sqrt{(F_x^2+F_y^2)(1+\mu^2)}}\right]$$

分析这方程式可知，当刀刃刃口半径 ρ 为某值时，能切下的最小切削厚度 $h_{D\min}$ 和临界点处的 $\frac{F_y}{F_x}$ 比值有关，并和刀具工件材料间的摩擦系数有关。

在切削时，A 点处的 $\frac{F_y}{F_x}$ 比值是和工件材料的强度、延伸率、摩擦系数有关，并和 A 点位置的高低有关。根据经验，A 点处的 $\frac{F_y}{F_x}$ 比值一般在 0.8～1 范围内。对于用金刚石刀具进行超精密切削，根据经验可以取 $F_y=0.9F_x$。

我们曾实测过金刚石和铝合金之间的摩擦系数为 0.06～0.13（随金刚石晶面不同和摩擦方向不同而变化），在切削过程中摩擦系数可假设为上述数值的两倍，即 $\mu=0.12～0.26$。

在 $F_y=0.9F_x$，$\mu=0.12$ 时，用前面公式可算出 $h_{D\min}=0.322\rho$

在 $F_y=0.9F_x$，$\mu=0.26$ 时，可算出 $h_{D\min}=0.249\rho$

图 2-24 中所示实际切削时能正常切削的最小切削厚度 $h_{D\min}=1\text{nm}$，这时可以估算所用的金刚石刀具刃口半径 ρ 应为 3～4nm。这是极为锋锐的金刚石刀具，它的刃口半径 ρ 值比现在生产中用的要小很多。

曾用高速钢和硬质合金刀具进行切削试验，研究能达到的最小切削厚度，得到如下结果：

用 W18Cr4V 刀具切 Q235 钢时，$h_{D\min}=0.248\rho$；

用 W18Cr4V 刀具切 45 钢时，$h_{D\min}=0.274\rho$；

用 YG8 刀具切 Q235 钢时，$h_{D\min}=0.350\rho$；

用 YG8 刀具切 45 钢时，$h_{D\min}=0.377\rho$；

参考实验结果，可以认为上面的理论推算是正确的。

现在我国生产中使用的金刚石刀具，刀刃锋锐度约为 $\rho=0.2～0.5\mu\text{m}$，特殊精心研磨可以达到 $\rho=0.1\mu\text{m}$。在对加工表面质量有特殊高要求时，特别是在要求残留应力和变质层很小时，需要进一步提高刀刃的锋锐度。

第七节　金刚石刀具晶面选择对切削变形和加工表面质量的影响

金刚石晶体具有强烈的各向异性，不仅不同晶面，而且不同方向的摩擦系数有明显差别。摩擦系数直接影响切削变形和加工表面质量，因此金刚石刀具的晶面选择直接影响切削变形和加工表面质量。

一、金刚石晶体的摩擦系数

经实测，金刚石晶体和铝合金、紫铜间的摩擦系数在 0.06～0.13 间，随金刚石晶面不同和摩擦方向不同而变化，实测结果见图 2-25。摩擦系数的测量是在合肥中科院物理所专用的摩擦系数测定仪上进行的。从实验结果可以看到：

1）(100) 晶面的摩擦系数曲线有 4 个波峰和波谷；(110) 晶面有两个波峰和波谷；(111) 晶面有三个波峰和波谷；

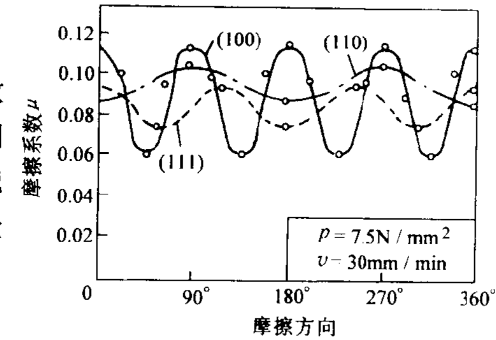


图 2-25　金刚石和铝合金 LY12 间的摩擦系数

2）如都以摩擦系数低的波谷比较，（100）晶面的摩擦系数最低；（111）晶面次之；（110）晶面最高；

3）如比较同一晶面的摩擦系数值的变化，（100）晶面的摩擦系数差别最大（0.06～0.11）；（110）晶面次之；（111）晶面最小。

二、金刚石刀具晶面不同对切削变形的影响

用对比实验的方法，比较金刚石刀具晶面不同对切削变形的影响。用两把金刚石车刀，几何形状相同，但№1车刀前、后面为（100）晶面；№2车刀为（110）晶面。比较切削变形大小是通过观察切屑外形，测量切屑变形系数和比较剪切角大小。

1）观察两把刀切下的切屑的外形，切屑的厚度，切屑上滑移线痕迹等，明显看出，采用（100）晶面的№1车刀切下的切屑变形，小于用（110）晶面的№2车刀切下的切屑的变形。

2）实测两把刀切下的切屑厚度，通过切屑厚度计算出切屑变形系数。№1车刀切下切屑的变形系数小于用№2车刀切下切屑的变形系数。

3）剪切角 ϕ 的计算：假设切削过程为直角自由切削，这时剪切角可用下式计算：

$$\tan\phi=\frac{\cos\gamma_0}{\Lambda_h-\sin\gamma_0}$$

式中　Λ_h 为变形系数。γ_0 为前角。实测№1和№2两把刀切下的不同材料的切屑厚度，计算出变形系数，再计算出实际切削时的剪切角（表2-5）。

从表中的数值可看到，№1车刀实际切削时剪切角大于用№2车刀，即用（100）晶面的№1车刀切削时的切削变形比用（110）晶面的№2车刀要小。这结果和理论分析结果是完全符合的。

表2-5　№1和№2车刀实际切削时的剪切角

	铝合金LY12	黄　铜	紫　铜
№1车刀	42°	38°	32°
№2车刀	38°	28°	27°

三、金刚石刀具晶面不同对加工表面质量的影响

1．加工表面粗糙度

用（100）晶面的№1车刀和（110）晶面的№2车刀，在相同的切削条件下加工紫铜，改变进给量得到的加工表面粗糙度见图2-26。这实验结果是在两把刀都比较锋锐的情况下获得的。可以看到№1车刀和№2车刀的加工表面粗糙度相差不多。

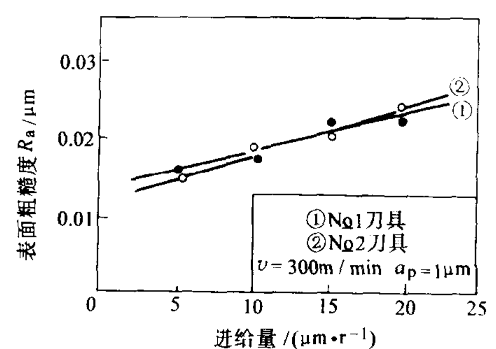


图2-26　不同晶面金刚石刀具的加工表面粗糙度，试件材料　紫铜

2．加工表面层的残余应力

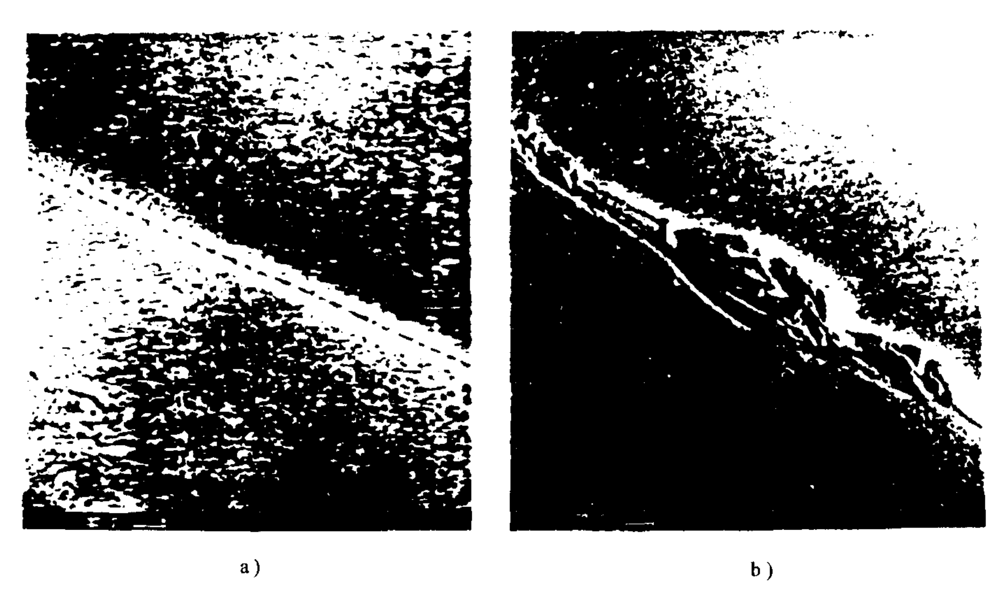
用上述两把金刚石车刀在相同的切削条件下加工紫铜。用日本的X射线应力测定仪MSE-2M型检测加工表面层的残余应力，从实验结果可看到，这两把金刚石车刀切出的加工表面层都有残余压应力，用（100）晶面的№1车刀切出的表面层残余压应力小于用（110）晶面的№2车刀所切出的，特别是切向残余应力。

用摩擦系数小的（100）晶面作金刚石刀具的前、后面，可使切削变形减小，并可减小后面与加工表面间的摩擦，这是加工表面残余应力能减小的原因。对要求残余应力小，要求长期尺寸稳定性高的精密零件的加工，这点应特别注意。

四、金刚石刀具晶面不同对刀具磨损的影响

使用（100）晶面和（110）晶面的金刚石刀具进行磨损耐用度对比实验。在两把刀均锋利时加工表面粗糙度相差不大。（110）晶面的刀具磨损较快，切削相当时间后，加工表面粗糙度已超过 $R_{max}0.05\mu m$；（100）晶面的刀具磨损较慢，切削较长时间后，加工表面粗糙度仍是 $R_{max}<0.05\mu m$，即刀具耐用度明显较高。

国外亦有类似的实验结果。美国海军武器研究中心 Michelson 实验室比较了前面为（100）晶面和（110）晶面的金刚石刀具切削紫铜和黄金时的刀具磨损。图 2-27 为不同晶面刀具切削紫铜后的刀具磨损情况。从图中可以明显看到（110）晶面的金刚石刀具磨损要比（100）晶面的刀具大得多。



a)　　　　　　b)

图 2-27　不同晶面金刚石刀具切削紫铜后的磨损情况

a)（100）晶面刀具　b)（110）晶面刀具

第八节　超精密切削对刀具的要求及金刚石的性能和晶体结构

一、超精密切削对刀具的要求

为实现超精密切削，刀具应具有如下性能：

1）极高的硬度、极高的耐磨性和极高的弹性模量，以保证刀具有很长的寿命和很高的尺寸耐用度。

2）刃口能磨得极其锋锐，刃口半径 ρ 值极小，能实现超薄切削厚度。

3）刀刃无缺陷，切削时刃形将复印在加工表面上，能得到超光滑的镜面。

4）和工件材料的抗粘结性好、化学亲和性小、摩擦系数低，能得到极好的加工表面完整性。

上述四项要求决定了超精密切削使用的刀具的性能要求。天然单晶金刚石有着一系列优异的特性，如硬度极高、耐磨性和强度高、导热性能好、和有色金属摩擦系数低、能磨出极锋锐的刀刃等。因此虽然它的价格昂贵，仍被一致公认为理想的、不能代替的超精密切削刀

具材料。在超精密切削的发展初期，人们把金刚石刀具切削和超精密切削等同起来，称 SPDT (Single Point Diamond Turning)。

人造聚晶金刚石无法磨出极锋锐的刃口，刃口半径很难达到 $\rho<1\mu m$，它只能用于有色金属和非金属的精切，很难达到超精密镜面切削。大颗粒人造单晶金刚石现在已能工业生产，并已开始用于超精密切削，但它的价格仍很昂贵。立方氮化硼（CBN）刀具现在用于加工黑色金属，但还达不到超精密镜面切削。

由于单晶金刚石现在是无法代替的超精密切削用刀具材料，金刚石性能有很多特点，故分析研究金刚石的性能是研究超精密切削的重要基础。

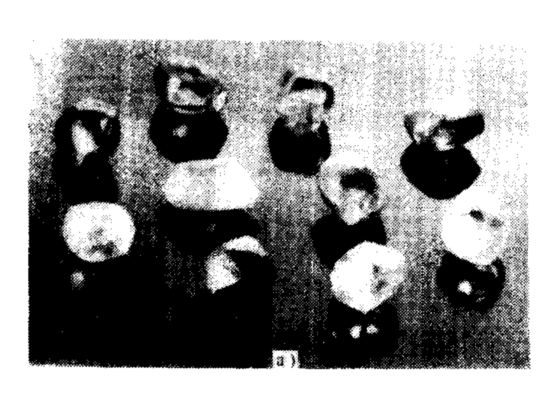
二、金刚石晶体的性能

1. 天然单晶金刚石

约 5000 年前在印度首先发现金刚石，它一直被认作最珍贵的饰物。由于金刚石是人类所知道的最硬的材料，有很多特殊的优异的性能，在工业中得到广泛的应用。现在天然金刚石年消耗量近五百万克拉（1 克拉＝0.2g），人造金刚石年消耗远远超过此数。

超精密切削刀具用的金刚石需要大颗粒（0.5～1.5 克拉）优质（一级品）的单晶金刚石。

优质天然单晶金刚石多数为规整的 8 面体或菱形 12 面体，少数为 6 面立方体或其他形状、浅色透明，无杂质，无缺陷。超精密切削刀具对所用金刚石的要求较严，故购买时应认真挑选。图 2-28a 是天然单晶金刚石的照片。



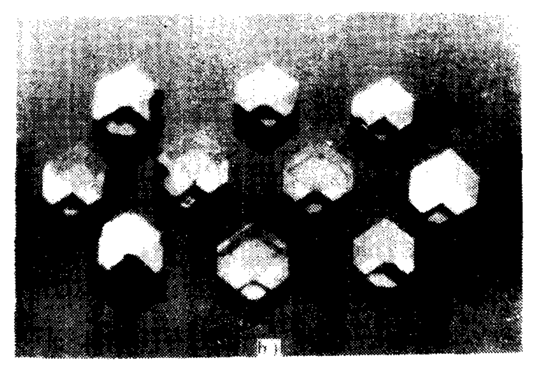


图 2-28　工业用大颗粒金刚石

a）工业用天然单晶金刚石　b）人造大颗粒单晶金刚石

2. 人造金刚石

人造金刚石是美国通用电器公司（GE 公司）1954 年首先研制成功的。开始仅能生成细颗粒的磨粒，用作磨料和制造金刚石砂轮。后来制成聚晶金刚石，用于制造地质钻探用钻头和制造刀具等。技术发展很快，现在已能生产大颗粒单晶金刚石，图 2-28b 是大颗粒人造单晶金刚石的照片。大颗粒人造单晶金刚石是在超高压（500MPa）高温（1300℃）下由子晶生长而成。图 2-29 是大颗粒单晶人造金刚石生产原理示意图。人造单晶金刚石的主要性能和天然金刚石相近，已有商品，但由于制造技术复杂，价格仍较昂贵。大颗粒人造单晶金刚石的制造要求很苛刻的条件（超高压、高温、高纯度材料等），并且要求很长的晶体生长时间。最新的研究是改进触媒使金刚石能在稍低的压力和温度下生长，这样就有希望降低人造金刚石的价格。人造单晶金刚石已用于制造超精密切削的刀具。

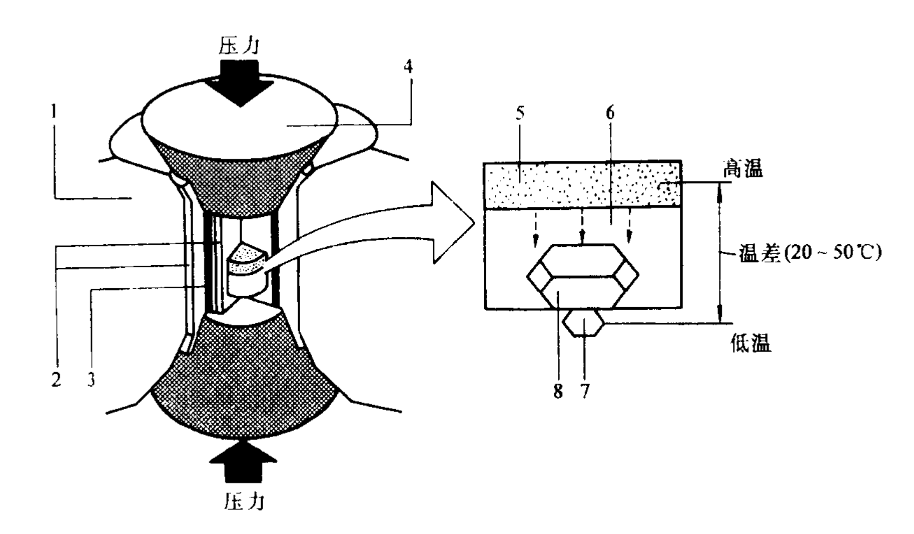


图 2-29　大颗粒人造单晶金刚石生产原理示意图

1—硬质合金模　2—压力介质　3—加热器　4—硬质合金压头　5—碳源
6—溶剂金属　7—晶种　8—人造晶体

3. 金刚石晶体的物理力学性能

金刚石是已知材料中硬度最高的。由于其晶体各向异性，在不同方向其物理力学性能是有明显差别的，金刚石和其他材料硬度的对比见表 2-6，金刚石的其他物理力学性能见表 2-7。

表 2-6　不同材料的硬度

	金刚石	CBN	SiC	TiC	WC	Al_2O_3	高碳马氏体
硬度 HV	6000~10000 随晶体方向 和温度而异	6000~8500	3500	3200	2400	2200	1000

从表 2-7 中金刚石的性能看，它有甚高的硬度、较高的导热系数、和有色金属间的摩擦系数低、开始氧化的温度较高，这些都是超精密切削刀具所要求的。此外单晶金刚石可以研磨达到极锋利的刃口（ρ 可以小到 0.05~0.01μm），没有其他任何材料可以磨到这样锋锐并且能长期切削而磨损很小。因此金刚石成为理想的、不能代替的超精密切削的刀具材料。

三、金刚石的晶体结构

金刚石晶体属于立方晶系，常遇到的天然单晶金刚石为 8 面体和 12 面体，有时也会遇到 6 面体或其他晶形。人造单晶金刚石常为 6 面体、8 面体和 12 面体。优质金刚石晶形都比较规整。

金刚石晶体具有各向异性和解理现象，不同晶向的物理性能相差很大，因此有必要了解金刚石的晶体结构及其特性。

按晶体学原理，金刚石晶体属 6 方晶系，单晶硅和金刚石有相同的晶体结构。

表 2-7　金刚石的物理力学性能

硬度 HV	6000~10000（随晶体方向和温度而有差别）
抗弯强度	210~490MPa
抗压强度	1500~2500MPa
弹性模量	$9\sim10.5\times10^{11}N/m^2$
导热系数	(2~4)×418.68W/(m·K)
比热容	0.516J/(g·C)(常温)
开始氧化温度	900~1000K
开始石墨化温度	1800K（在惰性气体中）
和铝合金，黄铜间摩擦系数	0.06~0.13（在常温下，随晶体方向不同而有差别）

1. 金刚石晶体的晶轴和晶面

按晶体学原理，六方晶系的金刚石晶体有三个主要晶面：(100)、(111)、(110)。当用X光对这些晶面垂直照射时，形成的衍射图形上的黑点显示出4次、3次、2次对称现象，故和上述晶面垂直的轴称为4次对称轴［和(100)晶面垂直］、3次对称轴［和(111)晶面垂直］、2次对称轴［和(110)晶面垂直］。

规整的单晶金刚石晶体有八面体、十二面体和六面体。八面体、十二面体和六面体中均有三根四次对称轴、四根三次对称轴、六根二次对称轴。

八面体有八个(111)面围成的外表面(图2-30)。在八面体中，两个对应四个面相交点的连线是四次对称轴，和四次对称轴垂直的各面为(100)晶面(图2-30a)，(111)晶面的法线方向是三次对称轴(图2-30b)，每两相对棱边的中点的连线方向是二次对称轴，和二次对称轴垂直的是(110)晶面(图2-30c)。

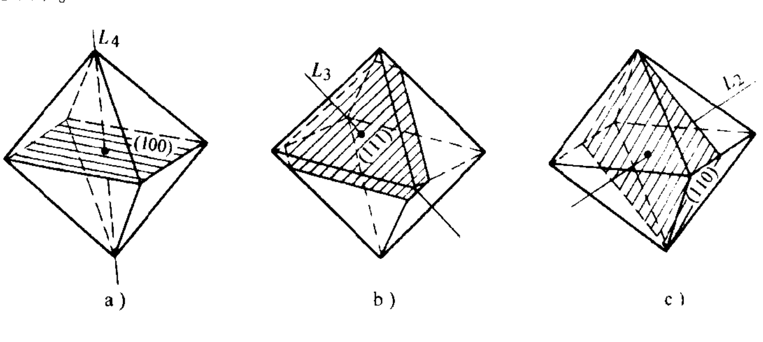


图2-30 八面体的晶轴和晶面
a) 四次对称轴和(100)晶面 b) 三次对称轴和(111)晶面
c) 二次对称轴和(110)晶面

菱形十二面体由十二个(110)晶面围成外表面。在菱形十二面体中，(110)晶面的法线方向是二次对称轴，两个对应三个面交点的连线是三次对称轴，和三次对称轴垂直的是(111)晶面，两个对应四个面交点的连线是四次对称轴，和四次对称轴垂直的是(100)晶面。

六面立方体是由六个(100)晶面围成外表面。在六面体中(100)晶面的法线方向是四次对称轴，两对应角的连线是三次对称轴，和三次对称轴垂直的是(111)晶面。每两对棱的中点连线方向是二次对称轴，和二次对称轴垂直的是(110)晶面。

2. 金刚石晶体的面网

晶体内部分布有原子的面是晶面，也称面网。金刚石是六方晶系，主要面网有(100)、(111)和(110)。面网上原子排列形式和原子密度不同和面网间的距离不同将直接影响其性能，造成金刚石晶体各向异性，晶体的不同晶向性能差异甚大。

(1) 金刚石晶体各面网的最小单元　从晶体学理论得知，金刚石晶体的(100)、(111)和(110)面网的最小单元如图2-31所示。

设金刚石晶体中单位晶胞(六面体)的边长为D ($D=a_0=0.35667$nm)，(100)面网的最小单元为正方形，边长为D。有五个碳原子(图2-31a)；(110)面网的最小单元为矩形，有八个碳原子，边长为D和$\sqrt{2}D$ (图2-31b)；(111)面网的最小单元为正三角形，有六个碳原子，边长为$\sqrt{2}D$ (图2-31c)。

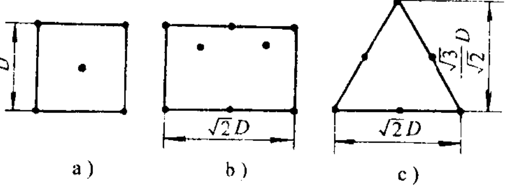


图2-31 金刚石不同晶面的面网最小单元
a) (100)晶面 b) (110)晶面 c) (111)晶面

(2) 金刚石晶体的面网密度　面网的单位面积上的原子数称为面网密度。

面网密度直接影响金刚石的硬度和耐磨性，下面分析金刚石晶体不同晶面的面网密度。

(100)面网的最小单元为正方形，正方形中原子分布如图2-31a所示，面积为D^2。正方形四个角

上的每个原子是四个相邻正方形所共有，每个原子在这正方形单元中只能算 1/4，故在这面积中的原子数等于 $4\times1/4+1=2$。(100) 面网的密度等于 $2/D^2$。

(110) 面网的最小单元为矩形，矩形中原子分布如图 2-31b 所示。此矩形的面积为 $D\times\sqrt{2}D=\sqrt{2}D^2$。矩形四个角上的每个原子是相邻四个矩形所共有，在此矩形中只能算 1/4；矩形两条长边中间的每个原子是两个相邻矩形所共有，在此矩形中只能算 1/2。因此在此矩形面积中的原子数等于 $(4\times1/4+2\times1/2+2=4)$。(110) 面网的密度等于 $4/(\sqrt{2}D^2)$。

(111) 面网的最小单元为三角形，三角形中原子分布如图 2-31c 所示。此三角形的面积为 $1/2\times\sqrt{2}D\times\sqrt{6}D/2=\sqrt{3}D^2/2$。三角形三个角上的每个原子是相邻六个三角形所共有，在此三角形中只能算 1/6；三角形三个边中间的每个原子是相邻两个三角形所共有，在此三角形中只能算 1/2。故在这三角形面积中的原子数等于 $(3\times1/6+3\times1/2)=2$。(111) 面网的密度等于 $2/(\sqrt{3}D^2/2)=4/(\sqrt{3}D^2)$。

(100)、(110) 和 (111) 面网密度之比为：

(100)密度：(110)密度：(111)密度＝1：1.414：1.154

看上述比例似乎是 (110) 面网密度最大，但是实际的金刚石晶体结构中，(111) 面网的面间距出现一宽一窄的交替（见后面图 2-32），窄的面间距甚小，以致实际中可以把这相邻的两个面网看成一个加厚的面网。将这两个靠得很近的 (111) 面网看成一体时，其密度应为两个面网密度之和，这使 (111) 面网密度增加了一倍。因此这三个晶面的面网密度之比为：

(100)密度：(110)密度：(111)密度＝1：1.414：2.308

实际金刚石晶体的 (111) 晶面的硬度和耐磨性均最高，这和面网密度的分析是一致的。

3. 金刚石晶体的面网距和解理现象

(1) 金刚石晶体的面网距　晶体面网之间的距离称为面网距。

根据晶体学理论，金刚石晶体的 (100)、(111) 和 (110) 面网之间的距离，如图 2-32 所示。从图可看到(100)面网和(110)网的分布是均匀的，(100)面网的面间距为 $D/4=0.089$nm；(110) 面网的面间距为 $\sqrt{2}D/4=0.126$nm。

从图 2-32 可看到，(111)面网的面间距出现一宽一窄的交替：宽的面间距为 $\sqrt{3}D/4=0.154$nm；窄的间距为 $\sqrt{3}D/12=0.051$nm。这窄的面间距甚小，实际中可以把这相邻两个面网看成一个加厚的面网。两个加厚面网的面间距，即(111)面的宽的面间距，成为(111)面的实际面间距。由于(111)面的宽的面间距(0.154nm)是金刚石晶体中所有晶面面间距中最大的一个，且其中的连接共价键数最少，使金刚石的破裂经常发生在两个加强的(111)面之间，造成金刚石晶体的解理现象。

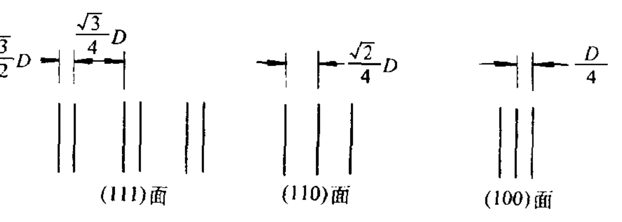


图 2-32　金刚石晶体不同晶面的面网距
（D——金刚石晶体中单位晶胞的棱边长）

(2) 金刚石晶体的解理现象　为了说明金刚石晶体的解理现象，图 2-33 画出了金刚石晶体中碳原子在 (111) 面分布的情况。图中面网与图面垂直（水平直线），原子间的直线表示共价键的结合方向，可看到一宽一窄交替出现的面间距。由于 (111) 面网的宽面间距比 (100) 和 (110) 面网的面间距都大，并且在面间距大的 (111) 面网之间，只需击破一个共价键就可以使其劈开，故劈开比较容易。金刚石内部的解理劈开，在绝大多数情

况下是与（111）面网平行，在两个相邻的加强（111）面网之间。在解理劈开时，可以得到很平的劈开面。

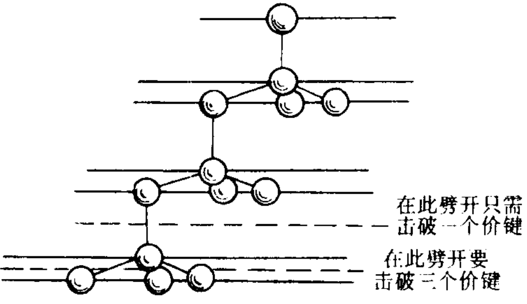


图 2-33 （111）面网的碳原子分布示意和解理劈开面

解理现象是某些晶体特有的现象，晶体受到定向的机械力作用时，可以沿平行于某个平面平整的劈开的现象，称为解理现象。

解理现象是金刚石晶体的一个非常重要的特性。金刚石晶体可以沿解理面［（111）面］平整的劈开两半，而且金刚石的破碎和磨损都和解理现象直接有关。要设计、加工制造和使用金刚石工具时，都必需熟悉了解金刚石的解理现象。

第九节 金刚石晶体各晶面的耐磨性和好磨难磨方向

一、金刚石晶体各晶面的耐磨性

金刚石晶体不同晶面耐磨性不同，并且同一晶面上不同方向耐磨性亦有很大差别。金刚石的耐磨性可用它的相对磨削率来表示。在对金刚石进行研磨加工时，各晶面均有所谓“好磨”和“难磨”方向，其磨削率相差甚大。金刚石硬度甚高，研磨加工甚难。因此，为加工金刚石必须知道各晶面的相对磨削率和各晶面的好磨和难磨方向。

为解决上述问题，曾有人做过如下实验研究。将金刚石固定在某夹具上，并保持在同一晶面上研磨。在研磨过程中逐次改变该晶面的研磨方向，同时记录偏转不同角度时的磨削率。磨削率是指单位载荷和单位线速度下的磨削体积（$\mu m^3/(N\cdot m\cdot s^{-1})$）。图 2-34 中给出了研磨（100）、（111）和（110）晶面时，研磨方向与磨削率关系的实验结果曲线。从图中可看到：

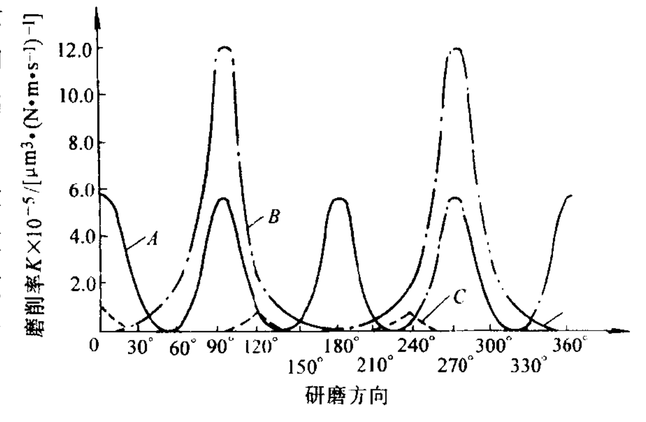


图 2-34 不同晶面研磨时研磨方向与磨削率的关系
A—（100）晶面；*B*—（110）晶面；*C*—（111）晶面

1）研磨（100）晶面，磨削率有 4 个峰值，即有 4 个磨削率高的方向，各相差 90°。高磨削率方向的磨削率 K（最大磨削率）为：

$$K=5.8\times10^{-5}\mu m^3/(N\cdot m\cdot s^{-1})$$

2）研磨（110）晶面，磨削率有两个峰值，即有两个磨削率高的方向，各相差 180°。高磨削率方向的磨削率 K（最大磨削率）为：

$$K=12.8\times10^{-5}\mu m^3/(N\cdot m\cdot s^{-1})$$

3）研磨（111）晶面，磨削率有三个峰值，即有三个磨削率高的方向，各相差 120°。高磨削率方向的磨削率 K（最大磨削率）为：

$$K=1\times10^{-5}\mu m/\ (N\cdot m\cdot s^{-1})$$

由此可见，都在高磨削率方向上，(110) 晶面的磨削率最高，最容易磨；(100) 晶面的磨削率次之，(111) 晶面磨削率最低，最不容易磨。都在高磨削率方向时，三个晶面磨削率之比为：

(100) 磨削率：(111) 磨削率：(110) 磨削率＝5.8：1：12.8

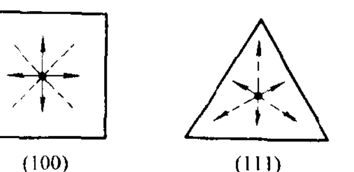
这三个晶面的低磨削率方向的磨削率都极低，如图所示，研磨甚难。

二、金刚石晶体各晶面的好磨难磨方向

金刚石的三个主要晶面磨削（研磨）方向不同时，磨削率相差甚大。现在习惯上把高磨削率方向称为“好磨方向”，把低磨削率方向称为“难磨方向”。

从上述实验结果（见图 2-34 可以得到，(100)、(111) 和 (110) 晶面的好磨和难磨方向，如图 2-35所示。

金刚石硬度极高，研磨加工效率甚低，因此合适的选择晶面，掌握各晶面的好磨、难磨方向，对加工制造金刚石用品是极其重要的。



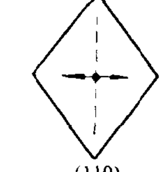


图 2-35 金刚石各晶面的好磨难磨方向

好磨方向←——

难磨方向←……

三、金刚石晶体研磨时摩擦系数的各向异性

为了解金刚石晶体磨削率的各向异性，下面是实测的金刚石晶体研磨时不同晶面不同方向的摩擦系数。研磨时使用铸铁研磨盘，ϕ300mm，转速 3000r/min，使用金刚石微粉作研磨剂。实测得到的摩擦系数，见图 2-36。从图中实测的结果可看到摩擦系数在 0.3～0.5 之间，摩擦系数随金刚石晶面不同、研磨方向不同而有明显差别：

1) 研磨金刚石晶体时，(110) 晶面摩擦系数最大，(100) 晶面次之，(111) 晶面最小。

2) 晶面的摩擦系数随摩擦方向不同而有明显差别。(100) 晶面有 4 个波峰和波谷，(110) 晶面有 2 个波峰和波谷，(111) 晶面有三个波峰和波谷。

3) 金刚石晶体研磨时，各晶面各方向摩擦系数的变化规律和研磨时磨削率的变化规律非常一致（参考图 2-34，摩擦系数高时磨削率亦高，摩擦系数低时磨削率亦低。摩擦系数曲线的波峰方向即是磨削率最高的“好磨方向”；摩擦系数曲线的波谷方向即是磨削率最低的“难磨方向”。

4) 研磨金刚石晶体时可以根据摩擦力的大小找出所磨晶面的好磨方向。

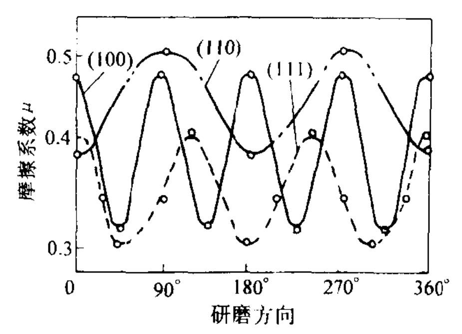


图 2-36 用铸铁盘研磨金刚石晶体时的摩擦系数

金刚石晶体磨研时摩擦系数大，说明这方向金刚石表层易于微观破损去除，消耗的能量大。摩擦系数大时，研磨消耗的功大，因而研磨温度增高，金刚石表层易于氧化或石墨化，将提高研磨效率。

根据实际研磨金刚石的经验，如研磨方向找得好，研磨顺手，不仅研磨效率高，并且有时还可看到微细的火花（在黑暗中），说明研磨时存在金刚石的氧化现象。

第十节 单晶金刚石刀具的磨损破损机理

一、单晶金刚石刀具磨损形态和微观崩刃的观察

用金刚石刀具进行超精密切削时，刀具不能继续使用的主要限制是加工表面粗糙度值超过规定。观察不能继续使用的金刚石刀具，可看到有些是由于机械磨损，有些是刀口发生微观崩刃。在加工研磨金刚石刀具时，刀口也很容易产生微观崩刃，得不到高质量的锋锐的刀刃。

在扫描电子显微镜下观察刀具磨损的形态和微观崩刃的刀刃时，经常发现刀具的机械磨损和微观崩刃是由于刀刃处的微观解理造成的。图 2-37 是磨损较剧烈的刀刃的扫描电镜 SEM 照片，可以很明显看出刀刃的机械磨损实际上是由于微观解理所造成的。观察刀刃的微观崩刃处，亦可看到类似的微观解理。在超精密切削时，如机床切削系统不够平稳，即使是很微小的振动，也很容易造成金刚石刀具刀刃的微观崩刃。有时金刚石刀具的磨损在前面，前面磨损成月牙洼。观察前面的磨损区，也经常可看到有微观解理的痕迹。图 2-38 所示，是前面磨损区的 SEM 照片，可很明显看出解理现象。这说明微观解理在金刚石刀具的磨损中起相当主要的作用。



图 2-37 金刚石刀具刀刃的机械磨损——微观解理

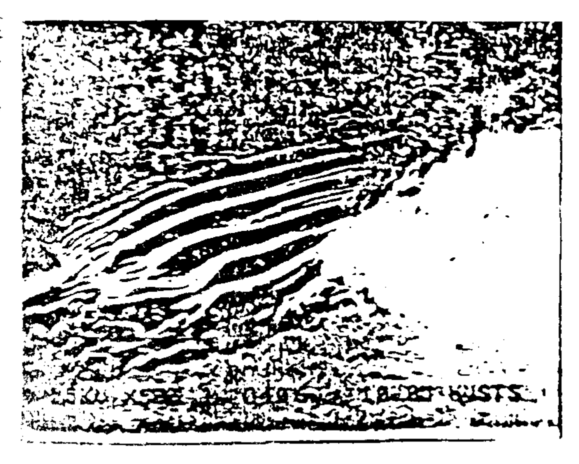


图 2-38 金刚石刀具前面的磨损区 SEM 照片
工件材料：铝镁合金，$v=300\text{m/min}$，干切

根据最新的研究，金刚石刀具的磨损，主要属机械磨损，其磨损本质是微观解理的积累。金刚石晶体的微观解理取决于它的微观强度，而微观强度是和该表面在晶体中的方位以及作用力的方向有直接关系。

二、金刚石晶体的破损机理和微观强度

日本井川直哉教授对金刚石的破损机理和微观强度进行了大量的工作，获得不少有意义的结果。

根据大量的试验证明，金刚石晶体的破损，主要产生于（111）晶面的解理。当垂直于（111）面的拉力超过某特定值时，两相邻的（111）面分离，产生解理劈开，这是解理现象的机理。

为检测金刚石的微观强度，进行 Hertz 破损试验。当金刚石压头的载荷增加到一定数值后，在压头外围倾斜向外产生裂纹，这时金刚石破损。经观察所产生的裂纹都是沿着（111）晶面的方向，故金刚石的破损也是沿（111）晶面的解理。

三、金刚石各晶面的微观破损强度

对金刚石刀具来说，刀刃处的解理破损是磨损和破损的主要形式，故刀刃的微观强度是

刀具设计选择晶面的主要依据。金刚石刀具选择前面和后面的最佳晶面，应该把不易产生解理破损作为重要的考虑因素。

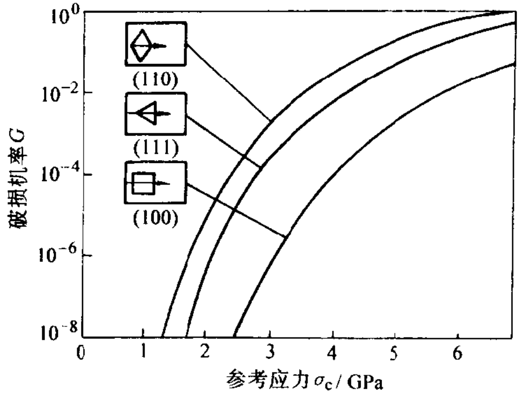


图 2-39 金刚石不同晶面破损的机率

图 2-39 是金刚石不同晶面在应力作用下产生破损的机率曲线。从图中可看到，当作用应力相同时，(110) 面破损的机率最大，(111) 面次之，(100) 面产生破损的机率最小。即在外力作用下，(110) 面最易破损，(111) 面次之，(100) 面最不易破损。这在设计金刚石刀具，选择前面和后面的晶面时，必须首先给予考虑。根据上面的分析可知，从增加刀刃的微观强度考虑，应选用微观强度最高的 (100) 晶面作为金刚石刀具的前面和后面。

第十一节 金刚石晶体的定向

由于金刚石晶体各向异性，不同晶向性能差别甚大，设计和制造金刚石刀具时，必须正确选择晶体方向。对金刚石原料必须先进行晶体定向，才能制造刀具。

现在采用的金刚石晶体定向方法有：人工目测定向；X 射线晶体定向；激光晶体定向。这三种金刚石晶体定向的方法，各有其优缺点，现分别说明如下。

一、金刚石晶体的人工目测定向

优质的单晶金刚石原料都是规整的晶体，可以用目测定向方法确定它的各晶面，这是最方便最实用的晶体定向方法。但对于不规整的晶体或已经磨制加工过的金刚石，目测定向方法就无法使用了。

天然的单晶金刚石常为八面体和十二面体；人造单晶金刚石则六面体、八面体和十二面体都有，其中六面体稍多。

六面体的金刚石晶体是正方形，它的六个面和八个角都是相同的，因此具有对称性。六面体的六个外表面是 (100) 晶面，和这些 (100) 晶面平行的面也是 (100) 晶面。六面体的八个角都是由三个相互垂直的 (100) 晶面所组成，是相同的。在六面体中，(110) 晶面与每两对棱的中点连线方向（二次对称轴）相垂直；(111) 晶面垂直于两对应角的连线（三次对称轴）。

八面体是天然单晶金刚石常遇到的，弄清八面体中的各晶面位置有助于搞清十二面体中的晶面位置。规整的八面体的八个外表面都是等边三角形（图 2-30）它的八个面和六个角都相同，因此具有对称性。八面体的八个外表面是 (111) 晶面，和这些 (111) 晶面相平行的面都是 (111) 晶面。通过四个对称顶角的面是 (100) 晶面，如图 2-30a 所示，(100) 晶面呈正方形。通过两个对称顶角和两个对称边中点的面是 (110) 晶面，如图 2-30c 所示。(110) 晶面呈菱形，长轴通过两个顶角点，短轴通过两对称边的中点。和上述 (100) 晶面和 (110) 晶面平行的相应面也是 (100) 晶面和 (110) 晶面。

菱形十二面体也是天然单晶金刚石常遇到的，规整的菱形十二面体的十二个外表面呈菱形，是 (110) 晶面和上述十二个 (110) 晶面平行的面也是 (110) 晶面。菱形十二面体中的

(111) 晶面垂直于两个对应三个面交点的连线（三次对称轴），(100) 晶面垂直于两个对应四个面交点的连线（四次对称轴）。

二、金刚石晶体的 X 射线定向

金刚石晶体目测定向法虽然简单易行，但定向精度低，使用有局限性。在科研实验中或定向精度要求较高时，现在采用 X 射线晶体定向。

X 射线晶体定向原理如下。当一定波长的 X 光束穿透晶体，它会使晶体内原子的电子开始振动，该振动电子将在各个方向发出散射光。该散射光在某些方向被反射增强，形成所谓衍射光束，它能在荧光屏幕上被观察到，并能使照相底片感光。

在满足反射的条件下，只有原子密集的晶面面网，如 (100)、(111)、(110) 晶面反射的 X 光才具有一定亮度，才能观察到衍射图像。

前面已介绍过金刚石晶体具有 4 次、3 次和 2 次对称轴，这些对称轴分别和 (100)、(111) 和 (110) 晶面垂直（参考图 2-30）。当 X 光束沿着 4 次、3 次或 2 次对称轴方向射入金刚石晶体，观察到的衍射图像上的光点，能显示出 4 次、3 次或 2 次对称现象。要用 X 光对金刚石晶体进行定向时，将金刚石放在 X 光束照射下，旋转被测定的金刚石，使 X 光的入射角改变，观察衍射图像的变化。当衍射图像中的光点出现 4 次、3 次或 2 次对称现象时，说明这时 X 光束已和金刚石的 4 次、3 次或 2 次对称轴重合，已找到了金刚石晶体的 4 次、3 次或 2 次对称轴的方位，也已确定了 (100)、(111) 或 (110) 晶面的空间方位。以上就是用 X 光进行金刚石晶体定向的基本原理。

用 X 光进行晶体定向的实际步骤比较简单。金刚石装在有角度刻度的可旋转卡具上。从 X 光管中发射出的 X 光束，经过平行光管穿过金刚石晶体，在一般位置被反射的 X 光束不形成任何对称性的、有规律的衍射图像。旋转装金刚石的卡具，使金刚石的 4 次、3 次或 2 次对称轴和射入 X 光束方向重合，出现对称衍射图像，这时即认为金刚石的某对称轴已被找到，已被定向。图 2-40 是表示 X 光束入射方向同八面体金刚石晶体的 4 次对称轴重合，这时衍射图像中的光点呈 4 次对称性。

金刚石晶体经 X 光定向后，可从装金刚石卡具的角度刻度上知道晶面的空间角度方位，将金刚石移到研磨夹具中，即可按要求的晶面方向进行研磨加工。

图 2-40　X 光束入射方向同金刚石八面体的 4 次对称轴重合

图 2-41 所示是金刚石晶体的 X 光衍射图像的实摄照片，所测为 (100) 晶面，衍射图像中的光点呈 4 次轴对称性。

图 2-42 中是金刚石晶体 (110) 晶面的 X 光衍射图像，衍射图像中的光点呈 2 次轴对称性。

X 光的晶体定向法定向精度高，且对已经加工过的金刚石亦可很方便地进行晶体定向。这方法的缺点是 X 光晶体定向仪只能在实验室中使用，且价格较高；X 光对人体有害，对操作者要求防护，因此操作比较费事。

三、金刚石晶体的激光定向

金刚石晶体的激光定向法是金刚石晶体的新定向方法。这定向方法所用的设备价格低、操作方便，有足够的定向精度，是一种较好的实用的新晶体定向方法。

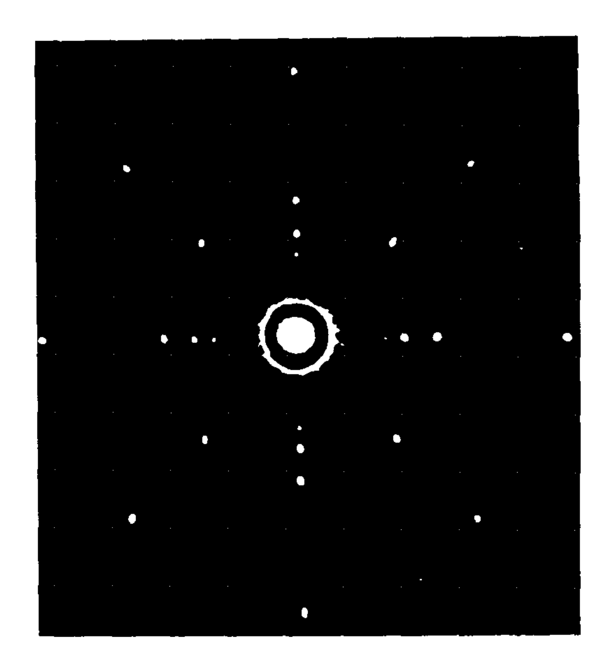


图 2-41　天然金刚石晶体（100）晶面的 X 光衍射图像

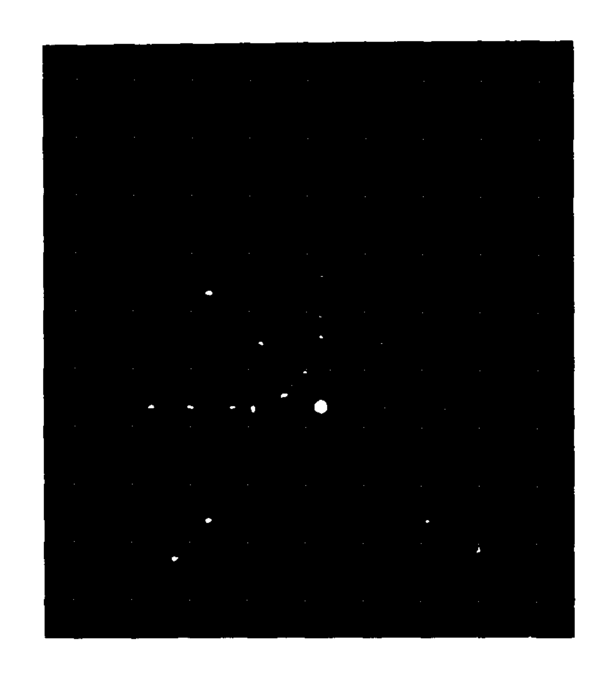


图 2-42　金刚石晶体（110）面的 X 光衍射图像

金刚石晶体的激光定向原理就是利用金刚石在不同结晶方向上，晶体结构不同，对激光反射而形成的衍射图像不同而进行的。激光晶体定向的原理示意图，见图 2-43。由氦氖激光管产生激光束，通过屏幕上的小孔，照射到金刚石表面。金刚石表面存在一些在生长过程中形成的形状规则的晶界晶纹和微观凹坑。当相干性比较好的激光照射到金刚石晶体表面上的这些晶纹和微观凹坑时，如被激光照射的金刚石表面是某晶面面网，转动金刚石使被测晶面与激光束相垂直，激光被反射到屏幕上，形成特征衍射光像，可根据衍射光像的图形知道被激光照射的晶面是什么晶面，也就确定了该晶面在金刚石晶体内的空间方位。

激光反射形成的衍射光像，是和金刚石表面的晶纹和微观凹坑具有对应关系。由于金刚石单晶各个晶面的结构不同，晶纹和微观凹坑的形状取决于各晶面面网的结构，即金刚石晶体的各晶面有其固定的晶纹和微观凹坑形状，因此各晶面反射激光而形成的衍射光像形状也是固定的。

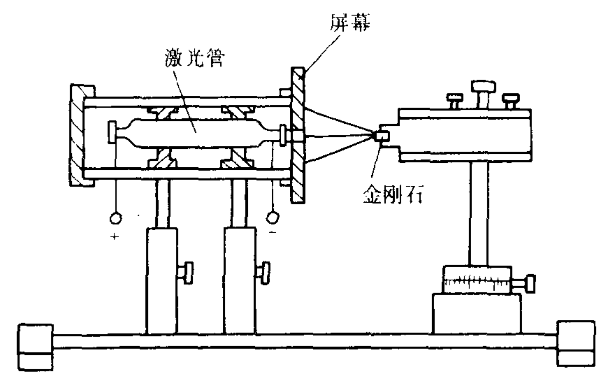


图 2-43　金刚石晶体的激光定向原理

为研究激光照射各晶面所形成的衍射光像图形和晶面的形貌的关系，对金刚石的各晶面都进行了检测和观察，图 2-44 中是（100）晶面的激光衍射光像，光像呈四叶形，而在扫描电镜下观察到的（100）晶面的表面晶纹和微观凹坑呈正方形。（100）晶面是和晶体的 4 次对称轴相垂直的，激光衍射光像呈四叶形。并且根据我们的研究衍射光像叶瓣所指方向是（100）晶面的好磨方向。

图 2-45 中是（110）晶面的激光衍射光像，光像呈二叶形。在扫描电镜下观察到的（110）晶面的表面晶纹和微观凹坑呈狭缝形和长条形。（110）晶面是和晶体的二次对称轴相垂直的，激光衍射光像呈二叶形。（110）晶面的激光衍射光像的叶瓣所指方向也是该晶面的

好磨方向。观察（110）晶面的激光衍射光像还发现，光像叶瓣所指方向是和狭长晶纹（或微观凹坑）相垂直的。

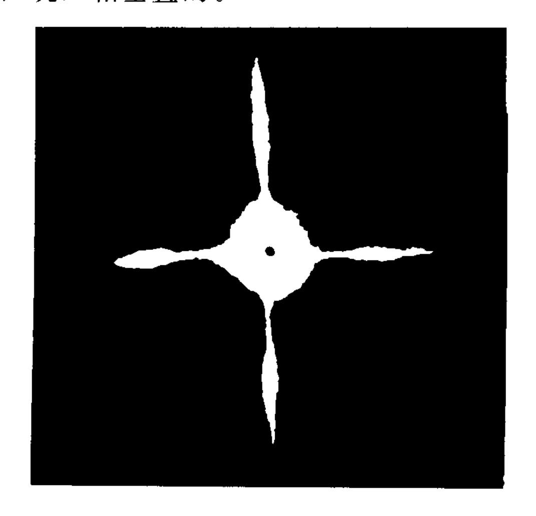


图 2-44　（100）晶面的激光衍射光像

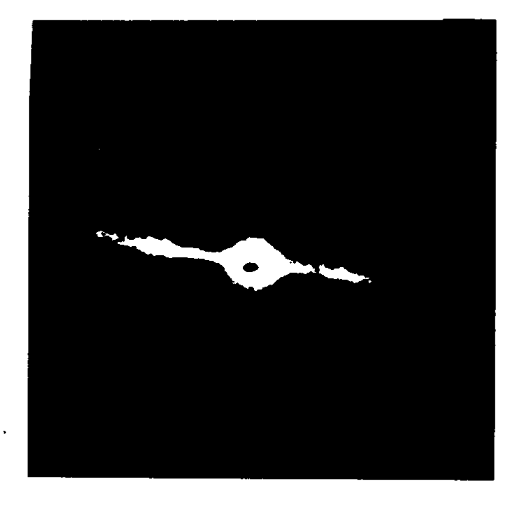


图 2-45　（110）晶面的激光衍射光像

图 2-46 中是（111）晶面的激光衍射光像，光像呈三叶形。在扫描电镜下观察到的（111）晶面的表面晶纹和微观凹坑呈正三角形。（111）晶面是和晶体的三次对称轴相垂直的，激光衍射光像呈三叶形。（111）晶面的激光衍射光像的叶瓣所指方向，也是该晶面的好磨方向。应注意，（111）晶面的好磨方向只是叶瓣所指方向，而逆这方向（相差 180°）就变成难磨方向。

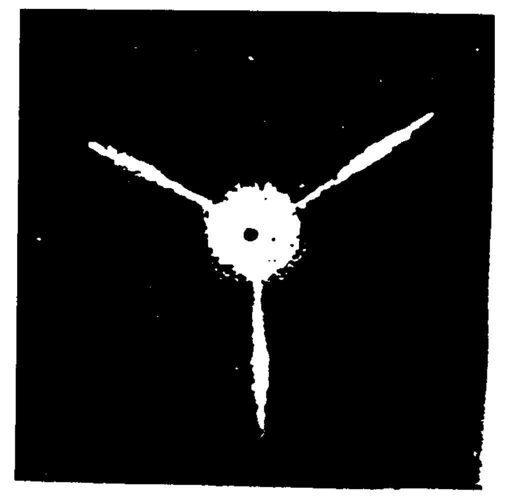


图 2-46　（111）晶面的激光衍射光像

金刚石晶体激光定向时所形成的光像，是由于激光衍射所形成的，而并非简单的反射作用。激光照射金刚石表面时，由于该晶面的表面晶纹和微观凹坑，会产生衍射，该衍射现象符合光学中的菲涅耳衍射（有限距离的衍射）。

曾以（100）晶面为例，对衍射光像的形成过程进行了计算机模拟仿真。（100）晶面的晶界微观凹坑为正方形，计算机模拟仿真得到的衍射光像和实际晶体定向得到的衍射光像是极为相似的。这证明光像是由衍射形成的理论是正确的。

买来的单晶金刚石原料，一般表面都有晶纹和微观凹坑，可以直接用激光进行晶体定向，较精确的测定晶面的空间方位。对已磨过的金刚石需要定向时，表面要进行腐蚀，露出晶纹和微观凹坑，再进行晶体定向。用激光进行晶体定向时，只有在晶面面网和激光束垂直时，才有清晰的光像；不垂直时光像模糊或看不到，因此晶面的定向可以达到较高精度。

用激光对金刚石晶体进行定向的方法，有如下优点：

1）设备价格便宜，约为 X 射线晶体定向仪价格的十分之一；

2）操作方便，对操作者无害。所用的氦氖激光管功率为 0.5W，对人体没有任何副作用，而 X 射线则对人体有害；

3）直观，不仅可确定晶面在晶体中的空间方位，而且可以知道这晶面的好磨方向；

4）激光定向法的定向精度可以满足生产需要，虽然略低于X射线晶体定向法，但更适宜于生产使用。

第十二节　金刚石刀具的设计与制造

一、金刚石刀具的设计

单晶金刚石刀具都用于超精密切削。衡量金刚石刀具质量的好坏，首先是能否加工出高质量的超光滑表面（$R_a=0.005\sim0.02\mu m$），其次是它能否有较长的切削时间保持刀刃锋锐（一般要求切削长度数百千米），仍能切出极高质量的加工表面。金刚石刀具的设计，主要就是要满足上述要求。

设计超精密切削用金刚石刀具最主要问题有三个：优选切削部分的几何形状，前后面选择最佳晶面，确定刀具结构和金刚石在刀具上的固定方法。下面分别说明这三个问题。

1. 金刚石刀具切削部分的几何形状

（1）刀头形式　金刚石刀具一般不采用主切削刃和副切削刃相交为一点的尖锐的刀尖，这样的刀尖不仅容易崩刃和磨损，而且在加工表面上留下加工痕迹，使表面粗糙度值增加。金刚石刀具的主切削刃和副切削刃之间采用过渡刃对加工表面起修光作用。有用直线修光刃，也有用圆弧修光刃的，这有利于获得好的加工表面质量。

图2-47是几种不同的刀头形式。其中图a一般不用；使用的是其他几种形式，有用小圆弧的，有直线修光刃的，有圆弧修光刃的。

国内在加工圆柱面、圆锥面和端平面时，多采用直线修光刃，直线修光刃制造研磨容易。这种刀要求对刀良好，直线修光刃应严格和进给方向一致，可以得到令人满意的加工表面（$R_a<0.02\mu m$）。直线修光刃的长度一般取0.1～0.2mm，修光刃太长会增加径向切削力，修光刃和工件表面过多摩擦会使表面粗糙度值增大，并加速刀具磨损。

国外金刚石刀具较多采用圆弧修光刃。超精密切削时进给量甚小，一般$f<0.02mm/r$，圆弧修光刃留下的残留面积极小，对表面粗糙度影响不大。采用圆弧修光刃时，对刀容易，使用方便，但刀具制造研磨费事，价格要高些。国外标准的金刚石刀具，推荐的修光刃圆弧半径$R=0.5\sim3mm$。

金刚石刀具的主偏角，平时采用30°～90°范围内，用得较多的是45°。

（2）前角和后角　由于金刚石的脆性，在保证获得较小的加工表面粗糙度前提下，为增加刀刃的强度，应采用较大的刀具楔角β，故刀具的前角和后角都取得较小。

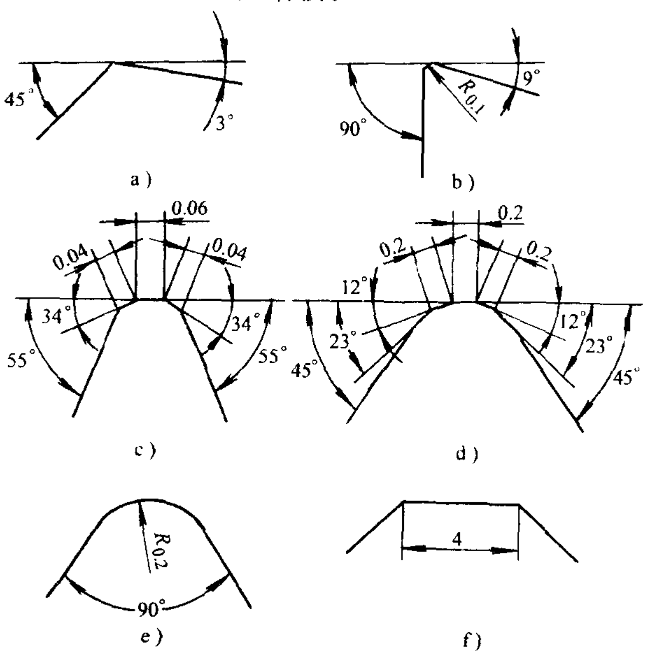


图2-47　金刚石刀具的不同刀头形式

增大金刚石刀具的后角α_p，可减少刀

具后面和加工表面的摩擦，可减小表面粗糙度。曾有试验，后角 α_p 增大到 15°，加工表面质量有明显提高。但为保证刀刃强度，一般取 $\alpha_p=5°\sim8°$，并且用得较多的是 5°～6°。加工球面和非球曲面的圆弧修光刃刀具，常取 $\alpha_p=10°$。

金刚石刀具的前角，根据加工材料选择，切铝、铜合金时前角可取 0°～5°。

（3）金刚石车刀举例　图 2-48 所示是一种可用于车削铝合金、铜、黄铜的通用金刚石车刀。这车刀采用主偏角 45°，前角 $\gamma_p=0°$，后角 $\alpha_p=5°$。采用直线修光刃，修光刃长度 0.15mm。这车刀在工厂中实际使用效果良好，能稳定的加工出 $R_a<0.02\sim0.005\mu m$ 的表面。

图 2-49 所示是美国 Contour 精密刀具公司的标准金刚石车刀。它采用圆弧修光刃，修光刃圆弧半径 $R=0.5\sim1.5mm$ 由用户自选。后角采用 $\alpha_p=10°$，刀具前角可根据加工材料由用户选定。

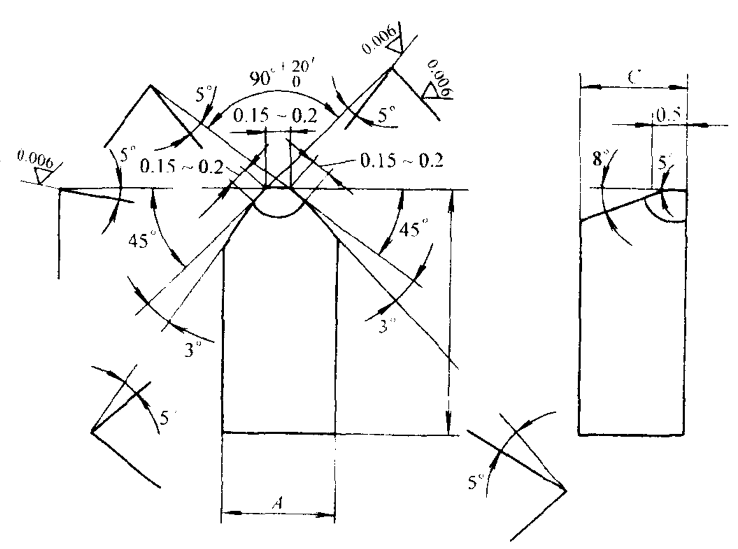


图 2-48　通用金刚石车刀

2. 金刚石刀具前、后刀面晶面的选择

由于单晶金刚石晶体的各向异性，各方向的性能（如硬度和耐磨性、微观强度和解理碎裂的或然率、研磨加工的难易程度等）相差甚为悬殊。因此金刚石刀具的前面和后面应选用什么晶面为佳，是设计金刚石刀具的一个重要问题。

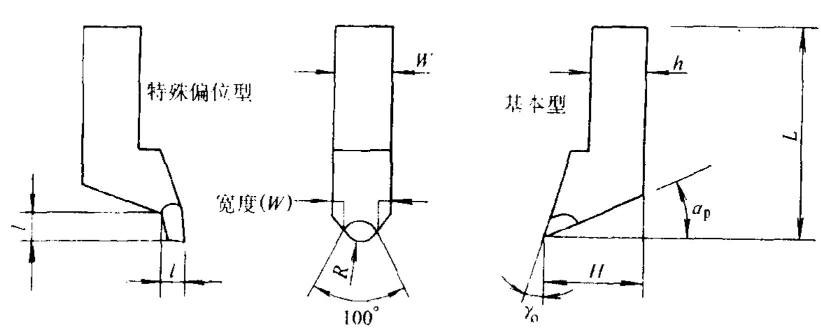


图 2-49　圆弧修光刃金刚石车刀

目前国内制造金刚石刀具，一般前面和后面都采用（110）晶面或者和（110）晶面相近的面（±3°～5°）。他们主要是从金刚石易于研磨加工出发，至于这样选用晶面后，对金刚石刀具的使用性能和刀具耐用度的影响如何，则并未考虑。很显然这样选取金刚石刀具的晶面方向，是缺少科学依据的。

国外的金刚石刀具产品，制造厂多数不公布其刀具前、后面的晶面选择资料。但有技术资料报道，有选用（100）晶面作为前面或后面的，也有选用（110）晶面作为前面或后面的。选用的理由说法不一，但都不够详细完善。选用（111）晶面作为前面或后面者极少，这可能是由于（111）晶面硬度太高，而微观破损强度并不高，研磨加工困难，很难研磨加工出精密

金刚石刀具要求的锋锐的刃口的原因。

主张选用（110）晶面作为前面或后面者的理由：

1）（110）晶面研磨加工容易些，研磨加工效率高，容易研磨出锋锐的刀刃。

2）有人做过试验，比较了两把金刚石车刀，前面一把是（110）晶面，另一把是（100）晶面。在切铝合金时，前面为（110）晶面者，切屑与前面间的摩擦系数要低于另一把刀。因此认为用（110）晶面为前面，摩擦系数低，可提高刀具耐用度。我们研究这试验报告后感到试验做得不够充分，因为金刚石同一晶面在不同方向摩擦系数是不同的，上述试验没有比较铝合金和（110）、（100）晶面不同方向的摩擦系数。因为实验不充分，结果很难作为依据。

我们推荐金刚石刀具的前面应选（100）晶面，理由如下。

金刚石刀具前后面晶面的选择主要应考虑下面几个因素：刀具耐磨性好；刀刃微观强度高，不易产生微观崩刃；刀具和被加工材料间摩擦系数低，使切削变形小，加工表面质量高；制造研磨容易。因（111）晶面不适合做前、后面，故下面只比较（100）晶面和（110）晶面作前、后具的优缺点：

1）（100）晶面的耐磨性明显高于（110）晶面，从前面的图2-34中可以看得很明确，因此用（100）晶面作为前、后面要比用（110）晶面时刀具有更长的耐用度和使用寿命。

2）（100）晶面的微观破损强度要高于（110）晶面，同时（100）晶面受载荷时的破损机率要比（110）晶面低很多，因此用（100）晶面做前、后面时，刀刃有较高的微观强度，产生微观崩刃的机率要小得多。

3）（100）晶面和有色金属之间的摩擦系数要低于（110）晶面的摩擦系数（见图2-25）。因此用（100）晶面做前、后面时，可以使切削变形减小，使加工表面的变形和残留应力减小，有利于提高加工表面质量。

研磨加工金刚石刀具时，（100）晶面的研磨效率低于（110）晶面，因此制造刀具的工时要长一些，这是选用（110）晶面的优点。但刀具晶面的选择，主要应该考虑的是刀具的使用性能，而不能只考虑刀具制造效率的高低，因此应该选用（100）晶面做刀具的前、后面。用（100）晶面做刀具的前、后面时，刀刃的微观强度高，不易产生微观崩刃，因此研磨出锋锐、完善、高质量的金刚石刀具刃口，反而要容易些。

在金刚石的晶体结构中，有三组相互垂直的（100）晶面。用于加工铝合金或铜合金的金刚石刀具，常取后角 $\alpha_p=5°\sim6°$，前角 $\gamma_o=-5°\sim-6°$。这时刀具楔角为90°，前面和后面均可选用（100）晶面，由于（100）晶面微观强度高，这时制造金刚石刀具易于研磨出锋锐刃口；使用这种金刚石刀具也容易在较长时间的切削后仍保持刃口锋锐，这对延长刀具耐用度是很有利的。

3. 金刚石刀具的结构和金刚石的固定方法

（1）金刚石车刀的结构　经常是把金刚石固定在小刀头上，小刀头用螺钉或压板固定在车刀刀杆上。这种结构并无特殊之处，不再介绍。

金刚石车刀也有将金刚石直接固定在车刀刀杆上的。

（2）金刚石在小刀头上的固定方法

1）机械夹固。这种夹固方式需将金刚石的底面和加压面磨平，用压板加压固定在小刀头上。用这种方式固定时，需要较大颗粒的金刚石。

2）用粉末冶金法固定。将金刚石放在合金粉末中，经加压在真空中烧结，使金刚石固定

在小刀头内。这种固定方法可使用较小颗粒的金刚石，对金刚石的使用较为经济，因此目前国际上用得较多。用这方法固定金刚石时，要使用热压真空烧结炉，价格较高。有单位试验用冷压，在保护气体中进行烧结，亦获得良好效果，而所用设备却大为简化。使用这种固定方法时，要注意正确选用合金粉末的成分比例，使烧结后能有较高的硬度和强度，保证金刚石有坚实的支承面，在使用中不会松动或塑性变形。

3）使用粘结或钎焊固定金刚石

有使用无机粘结剂或其他粘结剂固定金刚石的，但粘结强度都不高，金刚石容易掉下来。

使用钎焊方法固定金刚石是一种好办法，但金刚石钎焊是一项高度保密技术。

（3）一次性使用的不重磨精密金刚石刀具　金刚石刀具的加工研磨和用钝重磨，是一项保密性很强，难度很大的技术。国外金刚石刀具的使用厂多数都不自己磨刀，而将金刚石刀具送回原制造厂重磨。重磨收费很高且很不方便。Sumitomo 公司推出一次性使用不重磨的精密金刚石刀具。使用的金刚石颗粒很小，因此价格比较便宜。金刚石钎焊在硬质合金片上，再用螺钉夹固在车刀杆上。刀片结构见表 2-8。刀片上的金刚石由制造厂研磨得很锋锐，使用厂用钝后不再重磨。因所用金刚石颗粒小，价格较低，对使用超精密切削不太多的工厂，这种刀是适用的。

表 2-8　一次性使用的不重磨精密金刚石刀头

<table>
<tr><th rowspan="2">形　状</th><th rowspan="2">刀尖半径 R</th><th colspan="4">尺寸/mm</th></tr>
<tr><th>内接圆直径 φA</th><th>厚度 T</th><th>刀尖半径 R</th><th>孔径</th></tr>
<tr><td rowspan="5">R　80°　7°　φA　T</td><td rowspan="3">完整 R</td><td rowspan="3">6.35</td><td rowspan="3">2.38</td><td>0.1</td><td rowspan="3">3.75</td></tr>
<tr><td>0.2</td></tr>
<tr><td>0.4</td></tr>
<tr><td rowspan="2">不完整 R　0.5</td><td rowspan="2">6.35</td><td rowspan="2">2.38</td><td>0.8</td><td rowspan="2">3.75</td></tr>
<tr><td></td></tr>
</table>

二、金刚石刀具的研磨加工

一颗单晶金刚石毛坯，要做成精密金刚石刀具，首先要经过晶体定向，确定制成刀具的前面、后面的空间位置，确定需要磨去的部分。金刚石要再经过仔细检查，观察切削部分的金刚石内部有没有裂纹、杂质或其他缺陷。金刚石开始粗磨，一般采用高速旋转的铸铁盘加金刚石微粉进行粗研磨。基本成形后，最后进行精研，要求磨出锋锐、完好无缺陷的刀刃。磨好的金刚石刀具要经过严格检验，保证刀刃的质量，使之能切出超光滑的加工表面。

金刚石刀具的粗研磨费时很长，要研究提高其磨削效率。金刚石刀具的精研磨要求保证刃口的质量，达到极其锋锐而无缺陷。金刚石刀具的质量和所使用的精密研磨机及研磨技术直接有关，现介绍如下。

1. 金刚石刀具的研磨机

现在生产中使用的精密金刚石刀具研磨机的结构较为简单，其结构原理如图 2-50 所示。铸铁研磨盘装在两端有精密反顶尖的轴上，顶尖座用硬木制成（红木或梨木），使它能自动适应研磨盘轴的顶尖，达到较高的旋转精度。研磨盘的轴由柔软的丝质平带带动旋转，以减少

振动，使研磨盘很平稳的转动。研磨机具有较好的刚度和抗振性。

研磨盘用优质铸铁制造，要求表面平整，不得有砂眼或其他缺陷。研磨盘的直径一般取300mm，转速2000～3000r/min。研磨盘装在轴上后，要连轴进行精密平衡，以保证转动时的平稳性和无振动。

研磨时金刚石小刀头装在夹具中，按要求的角度调整好。加一定负载压在研磨盘上，再加上金刚石微粉对金刚石进行研磨加工。研磨盘的表面要定期修整，除去研磨盘表面留下的划痕。

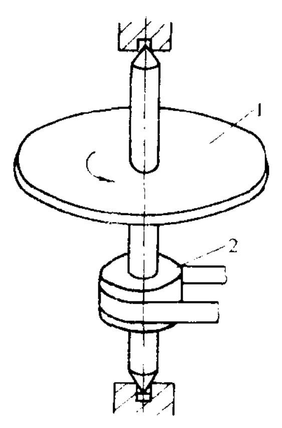


图 2-50　金刚石刀具研磨机结构原理图
1—研磨盘　2—皮带轮

由于超精密切削技术的迅速发展，对金刚石刀具的要求不断提高，上述结构的研磨机有时已不能满足要求。目前，已出现空气轴承主轴的研磨机，使金刚石刀具的制造技术又提高了一步。

2. 金刚石刀具的粗研

金刚石刀具粗研磨的主要任务是去除余量，这时的主要问题是如何提高研磨效率，但对研磨质量也有一定要求，要求粗研后的金刚石表面不能有大划痕、刀具刃口不能有崩刃或其他缺陷，否则将给精研造成很大困难。

金刚石粗研效率与下列因素有关：研磨方向、研磨速度和压力、使用的金刚石微粉的粒度等。

研磨金刚石时必须找到所磨晶面的好磨方向。偏离好磨方向，将使磨削效率大幅度下降如沿难磨方向研磨时，将发生打滑、振动、发出噪声和磨不动等现象。找准好磨方向时，可感到磨削平稳，此时研磨效率较高。

研磨线速度越高，研磨效率也越高。可通过提高研磨盘转速或增大研盘直径来提高研磨速度。但转速的提高受机床动态性能的限制，过高的转速易引起振动，降低研磨效率和质量；加大研盘直径将使研磨机体积增大，且因研盘重量过大，研磨机启动和停车时的惯性过大，因此研磨盘直径应有其合理值。

加大研磨压力，也可提高研磨效率。但压力过大，会影响金刚石的研磨表面质量。因为压力过大时，磨削力很大，将产生大量的磨削热，有时会使金刚石表面产生裂纹、破损或表面氧化。粗研时一般选压力为9～12N。

研磨金刚石所用的微粉粒度对研磨效率有直接影响。采用粗粒度的金刚石微粉可提高研磨效率，但使研磨表面粗糙度值增大，且易产生切削刃的微小的崩刃。因此，一般粗研初期可使用粒度较粗的金刚石微粉，在后期则采用粒度较细的金刚石微粉，以获得较高的研磨表面质量和良好的刃口状态。

3. 金刚石刀具的精研

金刚石刀具的精研加工是制造精密金刚石刀具的关键工序，这时考虑问题的出发点是如何提高研磨质量，使切削刃研制得更为锋锐。下面将说明各因素对精研刀具质量的影响。

(1) 磨料粒度　研磨金刚石刀具时，所用的金刚石微粉粒度越小时，研磨表面的粗糙度值也越小。

现在生产中研磨金刚石刀具时，粗研和精研都在同一块研磨盘上进行，即将研磨盘分为若干同心圆带，在大圆周处加粗金刚石微粉用于粗研，在小圆周处加细金刚石微粉，用于精研。

（2）研磨盘质量　研磨盘的质量对研磨效果影响很大。研磨盘的材质是否均匀细密、微孔尺寸是否一致及分布是否均匀，都直接影响研磨效率和质量。

研磨盘表面是否平整，对研磨质量也很有影响。研盘表面若不平整且有较多划痕，则研磨出的金刚石表面粗糙度值较大，切削刃很难磨制得锋锐平直。有些深的磨痕要经过多次研磨抛光才能去除，不仅影响研磨效率，而且影响研磨表面质量。

（3）研磨方向　研磨金刚石刀具时要注意研磨方向，应采取逆磨，也就是沿切削刃口指向刀体内的方向研磨。逆磨时切削刃承受压应力，而顺磨时切削刃承受拉应力。由于金刚石晶体的抗压强度大于抗拉强度，故顺磨时易产生崩刃，而逆磨时易得到锋锐完好的刃口。

（4）精抛　精抛是研磨时让金刚石作垂直于研磨方向的法向运动，以除去磨痕。金刚石刀具的最后精抛，对刀具的研磨质量影响很大。精抛操作通常是用人工进行，精抛时所加压力的大小及均匀性、摆动速度均匀与否都直接影响抛光质量。精抛完毕后要在运动中将金刚石刀具迅速地提离研磨盘。

复习思考题

2-1　金刚石刀具超精密切削有哪些应用范围？

2-2　金刚石刀具超精密切削的切削速度应如何选择？

2-3　试述超精密切削时积屑瘤的生成规律和它对切削过程和加工表面粗糙度的影响。

2-4　试述各工艺参数对超精密切削表面质量的影响。

2-5　超精密切削时如何才能使加工表面成为优质的镜面？

2-6　超精密切削时，金刚石刀具刀刃锋锐度对切削变形和加工表面质量的影响如何？

2-7　超精密切削时极限最小切削厚度是多少？

2-8　试述超精密切削用金刚石刀具的磨损和破损特点。

2-9　超精密切削对刀具有哪些要求？为什么单晶金刚石是被公认为理想的、不能代替的超精密切削的刀具材料？

2-10　单晶金刚石有哪几个主要晶面？

2-11　试述金刚石晶体的各向异性和不同晶面研磨时的好磨难磨方向。

2-12　金刚石刀具晶面选择对切削变形和加工表面质量的影响如何？

2-13　金刚石晶体有哪些定向方法？

2-14　试述金刚石晶体的激光定向原理和方法。

2-15　如何根据金刚石微观破损强度来选择金刚石刀具的晶面？

2-16　比较直线修光刃和圆弧修光刃金刚石刀具的优缺点。

2-17　单晶金刚石刀具的前面应选哪个晶面？

2-18　试述金刚石刀具的金刚石固定方法。

2-18　试述单晶金刚石刀具的研磨加工方法。

2-20　单晶金刚石刀具质量的好坏如何评定？

第三章　精密磨削和超精密磨削

第一节　精密和超精密磨削概述

精密和超精密磨料加工是利用细粒度的磨粒和微粉对黑色金属、硬脆材料等进行加工，得到高加工精度和低表面粗糙度值。对于铜、铝等及其合金等软金属，用金刚石刀具进行超精密车削是十分有效的，而对于黑色金属、硬脆材料等，用精密和超精密磨料加工在当前是最主要的精密加工手段。

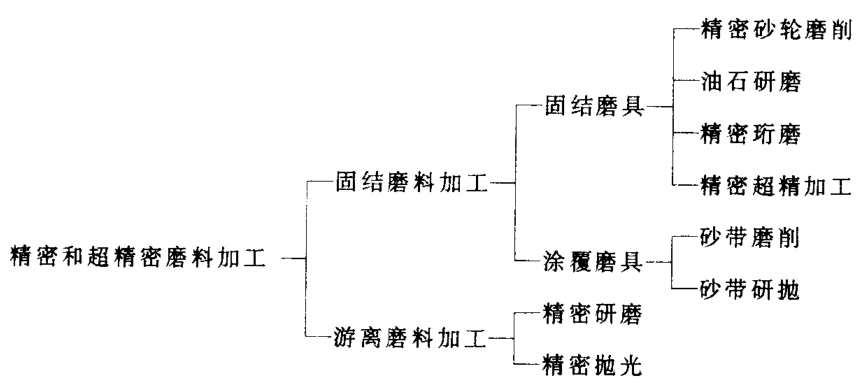
一、精密和超精密磨料加工方法分类

精密和超精密磨料加工可分为固结磨料和游离磨料两大类加工方式，它们所属的各种加工方法如表 3-1 所示。

1. 固结磨料加工

将磨粒或微粉与结合剂粘合在一起，形成一定的形状并具有一定强度，再采用烧结、粘接、涂敷等方法形成砂轮、砂条、油石、砂带等磨具。其中用烧结方法形成砂轮、砂条、油石等称为固结磨具；用涂敷方法形成砂带，称为涂覆磨具或涂敷磨具。

表 3-1　精密和超精密磨料加工方法分类



（1）精密和超精密砂轮磨削　精密砂轮磨削是利用精细修整的粒度为 60# ～80# 的砂轮进行磨削，其加工精度可达 1μm，表面粗糙度可达 R_a0.025μm。超精密砂轮磨削是利用经过仔细修整的粒度为 W40～W5 的砂轮进行磨削，可以获得加工精度为 0.1μm，表面粗糙度为 R_a0.025～0.008μm 的加工表面。

（2）精密和超精密砂带磨削　利用粒度为 W63～W28 的砂带可进行精密砂带磨削，其加工精度可达 1μm，表面粗糙度可达 0.025μm。利用粒度为 W28～W3 的砂带可进行超精密砂带磨削，其加工精度可达 0.1μm，表面粗糙度可达 R_a0.025～0.008μm。

（3）其他加工　如油石研磨、精密研磨、精密超精加工、精密砂带研抛、精密珩磨等。

2. 游离磨料加工

在加工时，磨粒或微粉不是固结在一起，而是成游离状态，其传统加工方法是研磨和抛光，近年来，在这些传统工艺的基础上，出现了许多新的游离磨料加工方法，如磁性研磨、弹

性发射加工、液体动力抛光、液中研抛、磁流体抛光、挤压研抛、喷射加工等。

精密磨削和超精密磨削一般多指砂轮磨削和砂带磨削，他们都是60年代发展起来的。

二、精密和超精密砂轮磨料磨具

1. 磨料及其选择

在精密磨削和超精密磨削中，除使用刚玉系、碳化物系磨料外，还大量使用超硬磨料，这是由于精密加工和超精密加工的要求所决定的。

超硬磨料在当前是指金刚石（包括人造金刚石）和立方氮化硼以及以它们为主要成分的复合材料。两种材料均属于立方晶系。金刚石分为天然的和人造的两大类。天然金刚石有透明、半透明和不透明的，以透明的为最贵重。颜色上有无色、浅绿、浅黄、褐色等，以褐色硬度最高，无色次之。人造金刚石分单晶体和聚晶烧结体两种，前者多用来做磨料磨具，后者多用来做刀具。金刚石是自然界中硬度最高的物质，有较高的耐磨性，它还有很高的弹性模量，可以减小加工时工件的内应力、内部裂隙和其他缺陷。金刚石有较大的热容量和良好的热导性，线膨胀系数小，熔点高。但700℃以上易与铁族金属产生化学作用而形成碳化物，造成化学磨损，故一般不适宜磨削钢铁材料。立方氮化硼的硬度略低于金刚石，但耐热性比金刚石高，有良好的化学稳定性，与碳在2000℃时才起反应，故适于磨削钢铁材料。由于它在高温下易与水产生反应，因此一般多用于干磨。

由于超硬磨料的上述特点，用它们制作的磨具在以下几方面能够满足精密加工和超精密加工的要求，因此使用广泛。

(1) 磨具在形状和尺寸上易于保持，耐用度高，磨削精度高。

(2) 磨料本身磨损少，可较长时间保持切削性，修整次数少，易于保持精度。

(3) 磨削时，一般工件温度较低，因此可以减小内应力、裂纹和烧伤等缺陷。

当然，超硬磨料能加工各种高硬的难加工材料是其突出的优越性，用超硬材料磨削陶瓷、光学玻璃、宝石、硬质合金以及高硬度合金钢、耐热钢、不锈钢等材料已十分普遍。

表3-2列出了超硬磨料和普通磨料的主要物理性能。从总的物理性能来看，立方氮化硼磨料有较大的发展前途。

表3-2 各种磨料的主要物理性能

磨料			显微硬度/HV	抗弯强度/MPa	抗压强度/MPa	热稳定性/℃
超硬磨料系	金刚石	天然	8600～10600	210～490	2000	700～800
		人造		300		
	立方氮化硼		7300～9000	300	800～1000	1250～1350
普通磨料系	碳化物系	碳化硼	4150～9000	300	1800	700～800
		碳化硅	3100～3400	155	1500	1300～1400
	刚玉系		1800～2450	87.2	757	1200

2. 磨料粒度及其选择

磨料从其粒度考虑可分为磨粒和微粉两大类。

对于精密磨削和超精密磨削，其粒度选择应根据加工要求、被加工材料、磨料材料等来决定，其中影响很大的是被加工表面粗糙度、被加工材料和生产率。一般多选用180#～240#普通磨料、170/200～325/400超硬磨料的磨粒和各种粒度的微粉。粒度号越大，加工表面粗糙度值可越低，但生产率也可能越低。

3. 结合剂及其选择

结合剂的作用是将磨料粘合在一起，形成一定的形状，并有一定的强度。对于精密和超精密磨削磨具，常用的结合剂有树脂结合剂、陶瓷结合剂和金属结合剂。结合剂会影响砂轮的结合强度、自锐性、化学稳定性、修整方法等。

4. 组织和浓度及其选择

普通磨具中磨料的含量用组织表示，它反映了磨料、结合剂和气孔三者之间体积的比例关系。

超硬磨具中磨料的含量用浓度表示，它是指磨料层中每 1cm³ 体积中所含超硬磨料的重量，浓度越高，其含量越高。浓度值与磨料含量的关系如表 3-3 所示。

表 3-3 超硬磨具浓度值与磨料含量的关系

浓度代号	质量浓度/(%)	磨料含量/(g·cm⁻³)	磨料在磨料层中所占体积/(%)
25	25	0.2233	6.25
50	50	0.4466	12.50
75	75	0.6699	18.75
100	100	0.8932	25.00
150	150	1.3398	37.50

浓度直接影响磨削质量、效率和加工成本，选择时应综合考虑磨料材料、粒度、结合剂、磨削方式、质量要求和生产率等因素。对于人造金刚石磨料，树脂结合剂磨具的常用质量浓度为50%～75%，陶瓷结合剂磨具的质量浓度为75%～100%，青铜结合剂磨具的质量浓度为100%～150%，电镀的质量浓度为150%～200%。对于立方氮化硼磨料，树脂结合剂磨具的常用质量浓度为100%，陶瓷结合剂磨具的质量浓度为100%～150%，一般都比人造金刚石磨具的质量浓度高一些。总的来说，成形磨削、沟槽磨削、宽接触面平面磨削选用高质量浓度；半精磨、精磨选用细粒度、中质量浓度；高精度、低表面粗糙度值的精密磨削和超精密磨削选用细粒度、低质量浓度，甚至低于25%。这主要考虑砂轮堵塞发热问题。

5. 硬度及其选择

普通磨具的硬度是指磨粒在外力作用下，自磨料表面脱落的难易程度。磨具硬度低表示磨粒易脱落。

超硬磨具中，由于超硬磨料耐磨性高，又比较昂贵，硬度一般较高，在其标志中，无硬度项。

6. 磨具的强度

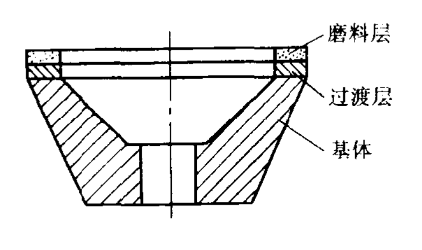
磨具的强度是指磨具在高速回转时，抵抗因离心力的作用而自身破碎的能力。对各类磨具都有最高工作线速度的规定。

7. 磨具的形状和尺寸及其基体材料

根据机床规格和加工情况选择磨具的形状和尺寸。超硬磨具一般由磨料层、过渡层和基体三个部分组成，所以有磨具断面形状、磨具基体基本形状和磨料层断面形状，以及磨料层在基体上的位置等。超硬磨具结构中，有些厂家把磨料层直接固定在基体上，取消了过渡层。超硬磨具结构见图 3-1。基体的材料与结合剂有关，金属结合剂磨具大多采用铁或铜合金；树脂结合剂磨具采用铝、铝合金或电木；陶瓷结合剂磨具多采用陶瓷。

三、精密和超精密涂覆磨具

涂覆磨具是将磨料用粘接剂均匀地涂覆在纸、布或其他复合材料基底上的磨具，又称涂敷磨具，其结构示意图如图 3-2。常用的涂覆磨具有砂纸、砂布、砂带、砂盘、砂布页轮和砂布套等。



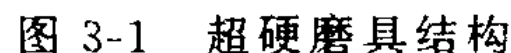


图 3-1 超硬磨具结构

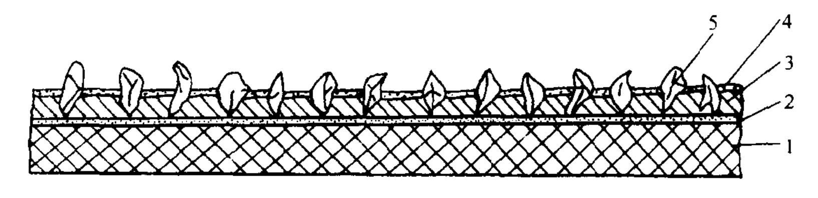


图 3-2 涂覆磨具结构示意图

1—基底 2—粘接膜 3—粘接剂(底胶) 4—粘接剂(覆胶) 5—磨粒

1. 涂覆磨具分类

根据涂覆磨具的形状、基底材料和工作条件与用途等，其分类可如表 3-4 所示。

涂覆磨具产品有干磨砂布、干磨砂纸、耐水砂布、耐水砂纸、刚纸磨片（砂盘)、环状砂带（有接头、无接头)、卷状砂带等。

表 3-4 涂覆磨具分类

涂覆磨具		
工作条件	基底材料	形状
耐水 (N)	复合	盘状 (P)
干磨 (G)	塑料膜	带状 (D)
	化纤布	环状
	棉布 (B)	卷状 (J)
	纸 (Z)	页状 (Y)

2. 涂覆磨料及其粒度

常用的涂覆磨料有棕刚玉、白刚玉、铬刚玉、锆刚玉、黑色碳化硅、绿色碳化硅、氧化铁、人造金刚石等。

涂覆磨料的粒度与普通磨料粒度近似，但无论是磨粒还是微粉，一律用冠以 P 字的粒度号表示，如涂覆磨料粒度号 P240 与普通磨料粒度号 240 一样，而 P320 相当于 W50，P1000 相当于 W20，具体可查有关手册。

3. 粘接剂

粘接剂又称为胶，其作用是将砂粒牢固地粘接在基底上。粘接剂是影响涂覆磨具的性能和质量的重要因素。根据涂覆磨具基底材料、工作条件和用途等不同，粘接剂又可分为粘接膜、底胶和覆胶。当基底材料为聚酯、硫化纤维时，为了使底胶能与基底牢固粘接，要在聚酯膜、硫化纤维布上预先涂上一层粘接膜，而对于基底材料为纸、布等则不必预涂粘接膜。有些涂覆磨具采用底胶和覆胶的双层粘接剂结构，一般取粘接性能较好的底胶和耐热、耐湿、富有弹性的覆胶，使涂覆磨具性能更好。大多数涂覆磨具都是单层胶。

粘接剂的种类如下：

(1) 动物胶 主要有皮胶、明胶、骨胶等。粘接性能好，价格便宜，但溶于水，易受潮，稳定性受环境影响。用于轻切削的干磨和油磨。

(2) 树脂 主要有醇酸树脂、胺基树脂、尿醛树脂、酚醛树脂等，树脂粘接性能好，耐热、耐水或耐湿，有弹性，有些树脂成本较高，且易溶于有机溶液。用于难磨材料或复杂形面的磨削或抛光。

(3) 高分子化合物 如聚醋酸乙稀酯等，粘接性能好，耐湿，有弹性，用于精密磨削，但成本高些。

除上述一般粘接剂外，还有特殊性能的、在覆胶层上再敷一层超涂层粘接剂，如抗静电超涂层粒接剂，可避免砂带背面与支承物之间产生静电而附着切屑粉尘；抗堵塞超涂层粘接剂，

是一种以金属皂为主的树脂，可避免砂带表面堵塞；抗氧化分解超涂层粘接剂，由高分子材料和抗氧化分解活性材料所组成，加工中有冷却作用，可提高砂带耐用度和工件表面质量。

4. 涂覆方法

涂覆方法是影响涂覆磨具质量的重要因素之一，不同品种的涂覆磨具可采用不同的涂覆方法，以满足使用要求。当前，涂覆磨具的制造方法有重力落砂法、涂敷法和静电植砂法等，如图 3-3a、b、c 所示。

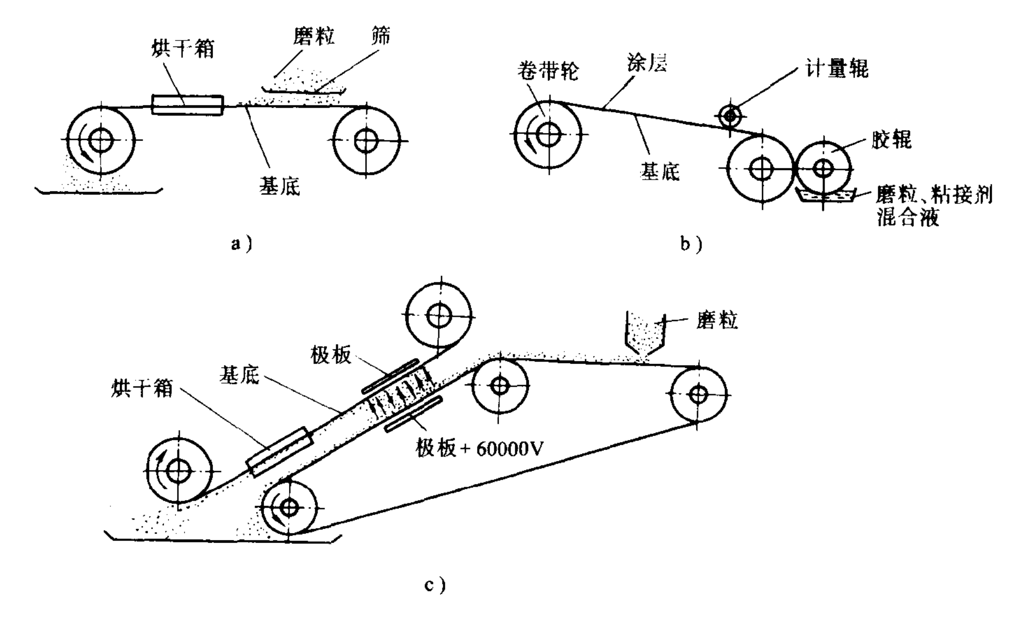


图 3-3　涂覆磨具涂覆方法示意图

a) 重力落砂法　b) 涂敷法　c) 静电植砂法

(1) 重力落砂法　先将粘接剂均匀涂敷在基底上，再靠重力将砂粒均匀地喷洒在涂层上，经烘干去除浮面砂粒后即成卷状砂带，裁剪后可制成涂覆磨具产品，整个过程自动进行。一般的砂纸、砂布均用此法，制造成本较低。

(2) 涂敷法　先将砂粒和粘接剂进行充分均匀地混合，然后利用胶辊将砂粒和粘接剂混合物均匀地涂敷在基底上。粘接剂和砂粒的混合多用球磨机，而涂敷多用类似印刷机的涂敷机，可获得质量很好的砂带，一般塑料膜材料的基底砂带都用这种方法。简单的涂敷法也可用喷头将砂粒和粘接剂的混合物均匀地喷洒在基底上，多用于小量生产纸质材料基底的砂带，当然质量上要差一些。精密和超精密加工中所用的涂覆磨具多用涂敷法制作。

(3) 静电植砂法　其原理是利用静电作用将砂粒吸附在已涂胶的基底上，这种方法由于静电作用，使砂粒尖端朝上，因此砂带切削性强，等高性好，加工质量好，受到广泛采用。

第二节　精密磨削

精密磨削是指加工精度为 1～0.1μm、表面粗糙度达到 R_a0.2～0.025μm 的磨削方法，又称低粗糙度磨削，多用于机床主轴、轴承、液压滑阀、滚动导轨、量规等的精密加工。

一、精密磨削机理

精密磨削主要是靠砂轮的精细修整，使磨粒具有微刃性和等高性，磨削后，被加工表面

留下大量极微细的磨削痕迹，残留高度极小，加上无火花磨削阶段的作用，获得高精度和低表面粗糙度表面。因此精密磨削机理可归纳为以下几点：

(1) 微刃的微切削作用　应用较小的修整导程（纵向进给量）和修整深度（横向进给量）精细修整砂轮，使磨粒微细破碎而产生微刃，如图 3-4 所示。这样，一颗磨粒就形成了多颗微磨粒，相当于砂轮的粒度变细。微刃的微切削作用形成了低粗糙度表面。

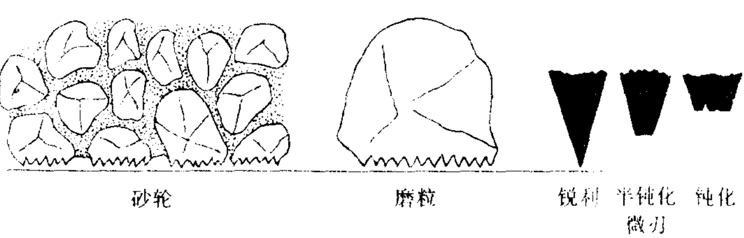


图 3-4　磨粒微刃性和等高性

(2) 微刃的等高切削作用　由于微刃是砂轮精细修整形成的，因此分布在砂轮表层的同一深度上的微刃数量多、等高性好，从而使加工表面的残留高度极小。微刃的等高性除与砂轮修整有关外，尚与磨床的精度、振动等因素有关。

(3) 微刃的滑挤、摩擦、抛光作用　砂轮修整得到的微刃开始比较锐利，切削作用强，随着磨削时间的增加而逐渐钝化，同时，等高性得到改善。这时，切削作用减弱，滑挤、摩擦、抛光作用加强。磨削区的高温使金属软化，钝化微刃的滑擦和挤压将工件表面凸峰辗平，降低了表面粗糙度值。

二、精密磨削砂轮选择

精密磨削时所用砂轮的选择以易产生和保持微刃及其等高性为原则。

在磨削钢件及铸铁件时，采用刚玉磨料较好。因为刚玉磨料韧性较高，能保持微刃性和等高性，而碳化硅磨料韧性差，颗粒呈针片状，修整时难以形成等高性好的微刃，磨削时，微刃易产生细微碎裂，不易保持微刃性和等高性。在刚玉类磨料中，以单晶刚玉最好，白刚玉、铬刚玉应用最普遍。

砂轮的粒度可选择粗粒度和细粒度两类。粗粒度砂轮经过精细修整，微刃切削作用是主要的；细粒度砂轮经过精细修整，半钝态微刃在适当压力下与工件表面的摩擦抛光作用比较显著，可得到质量更高的加工表面和砂轮耐用度。

结合剂的选择中，以树脂类较好。如果加入石墨填料，则可加强摩擦抛光作用。近年来出现的采用聚乙烯醇乙缩醛新型树脂加上热固性树脂作结合剂的砂轮，有良好弹性，抛光效果较好。另外，对粗粒度砂轮也可用陶瓷结合剂，加工效果也不错。

有关砂轮选择的具体情况见表 3-5。

表 3-5　精密磨削的砂轮选择

砂轮						被加工材料
磨粒材料	粒度号		结合剂	组织	硬度	
白刚玉(WA)	粗 60～80	细 240～W7	树脂(B) 陶瓷(V) 橡胶(R)	密 分布均匀 气孔率小	中软(K、L) 软(H、J)	淬火钢，15Cr、40Cr、9Mn2V，铸铁
铬刚玉(PA) 棕刚玉(A)						工具钢，38CrMoAl
绿碳化硅(GC)						有色金属

三、精密磨削时的砂轮修整

砂轮修整是精密磨削的关键之一，修整方法有单粒金刚石修整、金刚石粉末烧结型修整器修整和金刚石超声波修整等，如图 3-5。一般修整时，修整器应安装在低于砂轮中心 0.5～1.5mm 处，并向上倾斜 10°～15°，使金刚石受力小，使用寿命长。同时，金刚石的修整位置应与砂轮磨削时的位置相当，如果相差太大，则可能因砂轮架导轨扭曲，使得在磨削时出现单面接触，影响表面粗糙度，甚至产生螺旋形等缺陷。金刚石修整时的位置如图 3-6。金刚石超声波修整又分为点接触法和面接触法。点接触法的修整器是尖顶的。面接触法的修整器是平顶的，在超声波作用下，金刚石的一个小平面与磨粒接触，接触应力小，磨粒上不易产生裂纹，从而形成等高性很好的微刃。

砂轮的修整用量有修整导程、修整深度、修整次数和光修次数。修整导程（纵向进给量）和修整深度对工件表面粗糙度的影响，分别如图 3-7 和 3-8 所示。修整导程越小，工件表面粗糙度值越低，一般为 10～15mm/min，若过小，则工件易烧伤和产生螺旋形等缺陷。修整深度为 2.5μm/单行程，而一般修去 0.05mm 就可恢复砂轮的切削性能。修整时一般可分为初修与精修，初修用量可大些，逐次减小，一般精修需 2～3 次单行程。光修为无修整深度修整，主要是为了去除砂轮表面个别突出微刃，使砂轮表面更加平整，其次数一般为 1 次单行程。

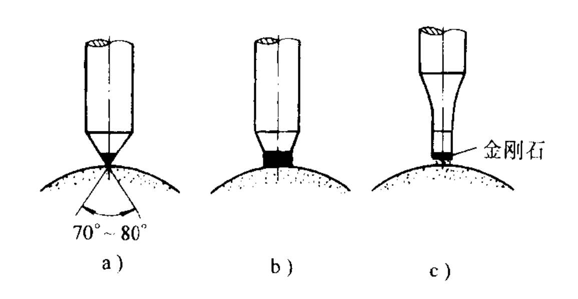


图 3-5 精密磨削时砂轮修整
a）单粒金刚石修整 b）金刚石粉末烧结型修整器修整 c）金刚石超声波修整

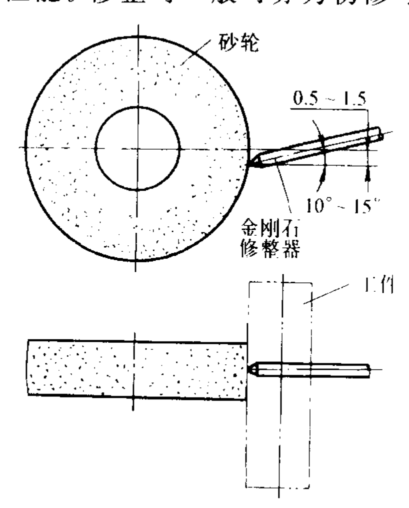


图 3-6 金刚石修整砂轮时的安装位置

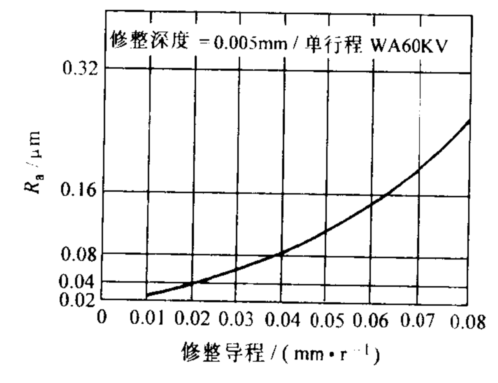


图 3-7 修整导程对工件表面粗糙度的影响

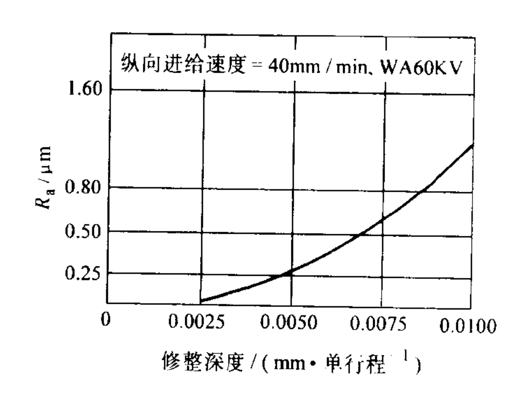


图 3-8 修整深度对工件表面粗糙度的影响

四、精密磨床

精密磨削要在相应的精密磨床上进行，可采用 MG 系列的磨床或将普通磨床进行改造，所用磨床应满足以下要求。

1. 高几何精度

精密磨床应有高的几何精度，主要有砂轮主轴回转精度和导轨平直度，以保证工件的几何形状精度要求。主轴轴承可采用液体静压轴承、短三块瓦或长三块瓦油膜轴承，整体多油楔式动压轴承及动静压组合轴承等，当前采用动压轴承和动静压组合轴承较多，这些轴承精度高、刚度好，转速也较高，而静压轴承精度高、转速高，但刚度差些，用于功率较大的磨床不太合适。主轴的径向圆跳动一般应$<1\mu m$，轴向圆跳动应限制在$2\sim3\mu m$以内。

有些精密磨床还配备了配磨装置，可自动进行径向及轴向配合尺寸的配磨，精度可达$0.25\mu m$，如液压阀阀芯和阀套圆柱面的配合间隙、轴向阀口开启量的配磨，可大大减轻手工研磨的高技艺繁重劳动。

2. 低速进给运动的稳定性

由于砂轮的修整导程要求10～15mm/min，因此工作台必须低速进给运动，要求无爬行和冲击现象，能平稳工作。这就要求对机床工作台运动的液压系统进行特殊设计，采取排除空气、低流量节流阀、工作台导轨压力润滑等措施，以保证工作台的低速运动稳定性。

对于横向进给，也应保证运动的平稳性和准确性，有时在砂轮头架移动上配置了相应要求精度的微进给机构。

3. 减少振动

精密磨削时如果产生振动，会对加工质量产生严重影响，因此，对于精密磨床，在结构上应考虑减少机床振动，主要措施有以下几方面：

1）电动机的转子应进行动平衡，电动机与砂轮架之间的安装要进行隔振，如垫以硬橡胶或木块。如果结构上允许，电动机最好与机床脱开，分离安装在地基上。

2）砂轮要进行动平衡，最好是安装在主轴上后进行动平衡，可采用便携式动平衡仪表，非常方便。如果没有动平衡的条件，则应进行精细静平衡。

3）精密磨床最好能安装在防振地基上工作，可防止外界干扰，如果没有防振地基，应在机床和地面之间加上防振垫。

五、磨削用量

1. 砂轮速度

一般在15～30m/s，砂轮速度进一步提高时，砂轮的切削作用增强，摩擦抛光作用减弱，对表面粗糙度不利。同时，高速时磨削热增加，机床容易产生振动，可能使加工表面产生烧伤、波纹、螺旋形等缺陷，因此砂轮速度取低一些为好。

2. 工件速度

一般为6～12m/min，工件速度较高时，易产生振动，工件表面可能有波纹；工件速度较低时，易产生烧伤和螺旋形等缺陷。视工件材料不同，砂轮速度与工件速度的比值可选于120～150之间。

3. 工件纵向进给量

由于砂轮经过精细修整，其切削能力有所减弱，因此，工件纵向进给量不宜过大，否则会使得表面粗糙度值增大，产生烧伤、螺旋形、多角形等缺陷，一般为50～100mm/min或0.06～0.5mm/r。

4. 横向进给量（吃刀量）

由于砂轮经过精细修整有微刃性，因此横向进给量不能超过微刃高度，一般取0.6～

2.5μm/单行程。

5. 进给次数

由于磨削余量一般为2～5μm，故横向进给次数约为2～3次（单行程）。

6. 光磨（无火花磨削）

用粗粒度砂轮（60～80）精细修整后进行精密磨削时，光磨次数视要求的加工表面粗糙度不同可采用5～8次。用细粒度砂轮（240～W7）精细修整后进行精密磨削时，光磨次数可选10～25次，见图3-9。光磨次数的确定主要是让磨床有关部件的弹性变形得以充分恢复，磨粒的微刃性的微切削、摩擦、抛光等作用得以充分发挥。

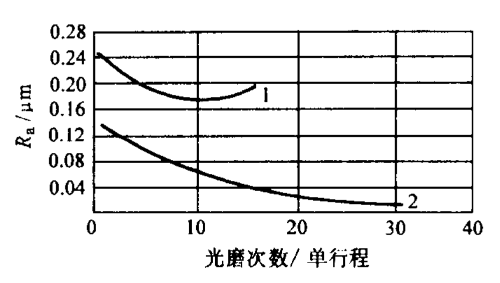


图3-9 光磨次数对工件表面粗糙的影响

1—粗粒度砂轮（PA60KV） 2—细粒度砂轮（WA、GCW10KR）

在精密磨削这节中，主要论述了刚玉类砂轮精密磨削中的一些问题。实际上，还有采用超硬磨料砂轮（金刚石砂轮和立方氮化硼砂轮）进行精密磨削这一重要方面的内容，这些内容将在下一节阐述。

第三节 超硬磨料砂轮磨削

超硬磨料砂轮目前主要指金刚石砂轮和立方氮化硼（CBN）砂轮，用来加工难加工材料，如各种高硬度、高脆性材料，其中有硬质合金、陶瓷、玻璃、半导体材料及石材等。由于这些加工的加工精度一般要求较高，表面粗糙度值要求较低，因此多属于精密磨削的范畴。

一、超硬磨料砂轮磨削特点

超硬磨料砂轮磨削的共同特点是：

1）可用来加工各种高硬度、高脆性金属材料和非金属材料，如陶瓷、玻璃、半导体材料、宝石、铜铝等有色金属及其合金、耐热合金钢等。由于金刚石砂轮易和铁族元素产生化学反应，故适于用立方氮化硼砂轮来磨削硬而韧的黑色金属材料及高温硬度高、热传导率低的黑色金属材料。立方氮化硼砂轮比金刚石砂轮有较好的热稳定性和较强的化学惰性，其热稳定性可达1250～1350℃，而金刚石磨料只有700～800℃。可参考表3-2。

2）磨削能力强，耐磨性好，耐用度高，易于控制加工尺寸及实现加工自动化。

3）磨削力小，磨削温度低，加工表面质量好，无烧伤、裂纹和组织变化。金刚石砂轮磨削硬质合金时，其磨削力只有绿色碳化硅砂轮的1/4～1/5。

4）磨削效率高。在加工硬质合金及非金属硬脆材料时，金刚石砂轮的金属切除率优于立方氮化硼砂轮，但在加工耐热钢、钛合金、模具钢等时，立方氮化硼砂轮远高于金刚石砂轮。

5）加工成本低。虽然金刚石砂轮和立方氮化硼砂轮比较昂贵，但其寿命长，加工效率高，工时少，综合成本低。

除共同特点外，金刚石砂轮磨削和立方氮化硼砂轮磨削尚有各自的特点，如立方氮化硼砂轮磨削时，其热稳定性好，化学惰性强，不易与铁素元素产生亲和作用和化学反应，加工黑色金属时，有较高的耐磨性。虽然当前其应用不如金刚石砂轮广泛，但它是一个很有前途的超硬磨料砂轮磨削方法。

二、超硬磨料砂轮修整

超硬磨料砂轮的修整是超硬磨料砂轮使用中的重要问题和技术难题，它直接影响被磨工件的加工质量、生产率和成本。

修整通常包括整形和修锐两个过程，修整是整形和修锐的总称。整形是使砂轮达到一定精度要求的几何形状；修锐是去除磨粒间的结合剂，使磨粒突出结合剂一定高度（一般是磨粒尺寸的1/3左右），形成足够的切削刃和容屑空间。普通砂轮的整形和修锐一般是合为一步进行的，而超硬磨料砂轮的整形和修锐一般是分为先后两步进行，有时，整形和修锐采用不同的方法。这是由于整形与修锐的目的和要求不同所致，整形要求效率高和砂轮几何形状，修锐要求有好的磨削性能。

超硬磨料砂轮修整的方法很多，可归纳为以下几类：

1. 车削法

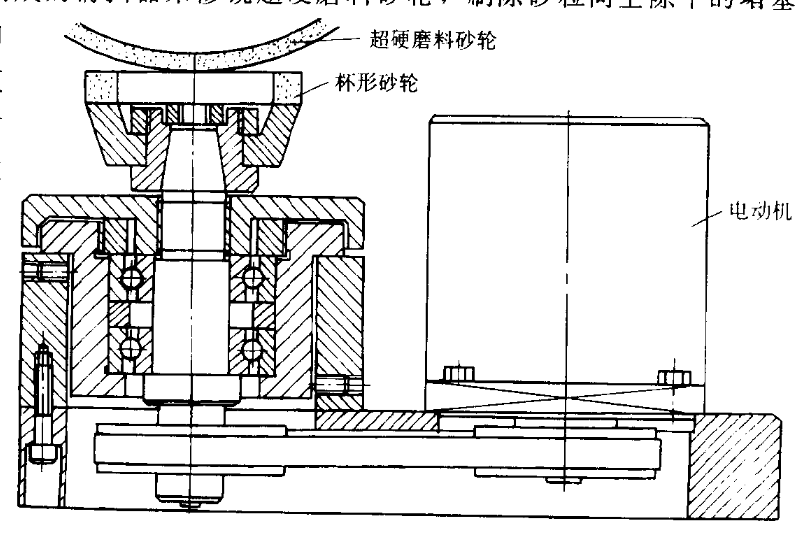
用单点、聚晶金刚石笔，修整片等车削金刚石砂轮以达到修整目的。这种方法的修整精度和效率都比较高，但修整后的砂轮表面平滑，切削能力低。

近年来研究出用高强纤维制成的清扫器来修锐超硬磨料砂轮，刷除砂粒间空隙中的堵塞物，又不使磨粒有过多的脱落和破损。如用玻璃纤维聚合物（直径13μm）单向排列，并用环氧树脂粘合在一起，就形成玻璃纤维清扫器，其修锐效果很好。

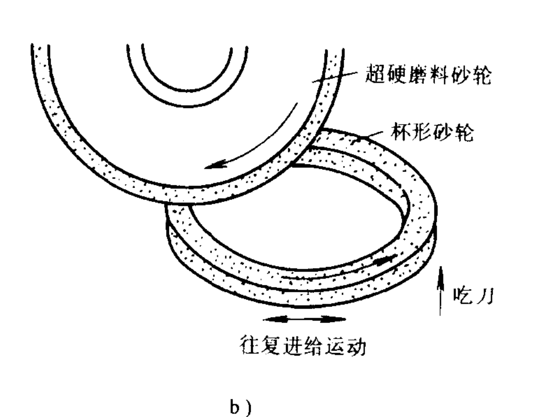
2. 磨削法

用普通磨料砂轮或砂块与超硬磨料砂轮对磨进行修整，普通磨料（如碳化硅、刚玉等）磨粒被破碎，对树脂、陶瓷、金属结合剂起切削作用，失去结合剂把持的超硬磨粒就会脱落。这种方法的效率和质量都较好，但普通砂轮、砂块磨损相当迅速，是目前最为广泛采用的修整方法。

普通磨削法由于修整轮或修整块与被修整砂轮平行，在修整过程中，修整轮的损耗远比超硬磨料砂轮大，同时修整后，砂轮的直线度不好，易产生锥形、中凹、中凸等形状。采用碳化硅（GC）杯形砂轮修整器进行修整，如图3-10所示，杯形砂轮轴线与被修整砂轮轴线垂直，修整时，杯形砂轮沿被修整砂轮圆周



a）



b）

图3-10 杯形砂轮修整器
a）修整器结构图 b）修整时的运动关系

的切线方向作往复进给运动，并在每一往复进给中，杯形砂轮与被修整砂轮脱开时进行一定量的吃刀。这种方法在修整效率和质量上都有提高，但杯形砂轮的损耗仍然较大。图 3-10a 为已商品化的杯形砂轮修整器，杯形砂轮由小型电动机带动，整个修整器可安装在平面磨床的磁力工作台上；图 3-10b 为修整时的运动关系。该种类型的杯形砂轮修整器已发展成为具有自动往复进给和吃刀的独立装置，可在各种磨床上修整陶瓷、金属结合剂金刚石砂轮等各种超硬磨料砂轮。

采用刚玉、碳化硅砂带修整超硬磨料砂轮有较好的效果，它是一种弹性修整法。

研磨法主要用来修整砂轮端面，将超硬磨料砂轮端面置于铸铁平台上，用碳化硅等游离磨料进行手工研磨，效率低，劳动量大。

用超硬磨料砂轮磨削软钢，利用磨削时形成的长切屑来刮除结合剂，可称之为软钢法，该法效率低，质量不稳定。

3. 滚压挤轧法

滚压法是用碳化硅、刚玉、硬质合金或钢铁等制成修整轮，与超硬磨料砂轮在一定压力下进行自由对滚（修整轮无动力），使结合剂破裂形成容屑空间，并使超硬磨粒表面崩碎形成微刃，该法修整效率低，修整压力大，要求磨床刚度高。

在钢质修整轮与超硬磨料砂轮的无速差对滚中，加入碳化硅、刚玉等游离磨料，依靠游离磨料挤轧作用，使超硬磨粒突出结合剂表面，多用于修锐，效果较好，如图 3-11。

图 3-11　游离磨料挤轧修锐法

1—振动机　2—气源　3—压缩空气　4—流量调整阀　5—磨料或玻璃球　6—筛网　7—电磁阀　8　高压空气及磨料　9—喷嘴　10—磨料或玻璃球　11—修整轮　12—超硬磨料砂轮

4. 喷射法

（1）气压喷砂法　将碳化硅、刚玉磨粒从高速喷嘴喷射到转动的砂轮表面上，从而去除部分结合剂，使超硬磨粒突出。一般喷嘴安装角 $\alpha=5°\sim15°$，喷射时间约 30s，主要用于修锐，效果较好，如图 3-12。

（2）液压喷砂法　用高压泵打出流量为 20L/min、压力为 150Pa 的冷却液，当冷却液进入喷嘴的旋涡室时，形成低压，从边孔中吸入碳化硅或刚玉等磨粒及空气，与冷却液形成混合液，并以高速从喷嘴喷射到转动的砂轮上，一般喷嘴安装角 $\alpha\leqslant10°$、h 值应尽量小些，视具体情况而定。这种方法修锐的砂轮精度高、锋利、修锐时间短，如图 3-13。

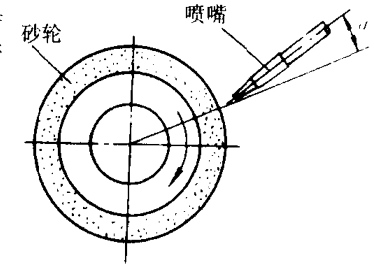


图 3-12　气压喷砂修锐法

5. 电加工法

（1）电解修锐法　其原理是利用电化学腐蚀作用蚀除金属结合剂，如图 3-14。这种方法的装备简单，可方便地实现在线修锐，当前已形成电解在线修锐（ELID—electrolytic in-process dressing）方法，多用于金属结合剂砂轮的修锐，非金属结合剂砂轮无效。该法不能用于整形。在对纤维铸铁结合剂金刚石砂轮进行修锐时，发现结合剂有钝化现象，使金刚石砂轮能保持长时间的切削能力。同时，钝化层会阻止电解的进一步进行；当突出的磨粒磨损后，钝化层被破坏，修锐作用会继续进行。

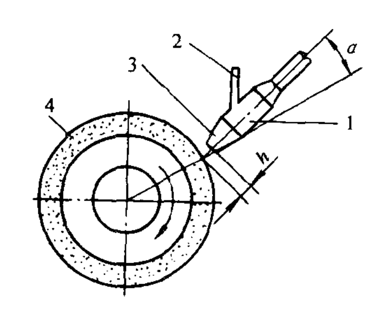


图 3-13 液压喷砂修锐法
1—旋涡 2—边孔 3—喷嘴 4—砂轮

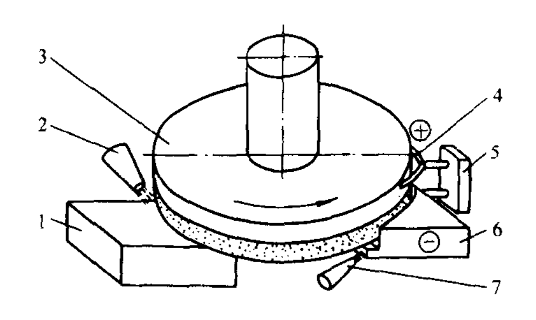


图 3-14 电解修锐法
1—工件 2—冷却液 3—超硬磨料砂轮 4—电刷
5—支架 6—负电极 7—电解液

电解修锐法的电刷接电装置因砂轮转速高而易于损坏，导致接触不良、打火等问题，图3-15为一种双电极电解修锐法，电极接电可靠，砂轮、机床均不带电，电源也相应简化为交流电源。从图中可看出电流通路为电极A、B和金属结合剂之间的电容网络，通入电解液后相当于阻容并联网络。

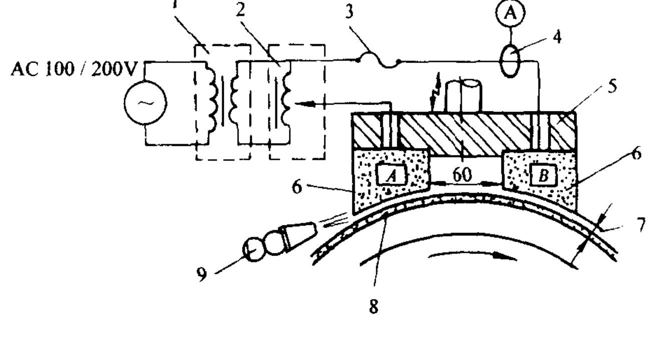


图 3-15 双电极电解修锐法
1—双线圈变压器 2—可调变压器 3—熔断丝 4—电流传感器
5—绝缘材料 6—石墨电极 7—间隙 8—超硬磨料砂轮
9—磨削液（电解液）

(2) 电火花修整法 其原理是电火花放电加工，适用于各种金属结合剂砂轮，若在结合剂中加入石墨粉，也可用于树脂、陶瓷结合剂砂轮。修整时可用电火花线切割方式和电火花成型方式进行修整。若配置数控系统，尚可进行成形修整。这种方法既可整形、又可修锐，效率较高，质量可与磨削法相当。图3-16为电火花修整法原理图。

6. 超声波振动修整法

用受激振动的簧片或超声波振动头驱动的幅板作为修整器，并在砂轮和修整器间放入混油磨料，通过游离磨料撞击砂轮的结合剂使超硬磨粒突出结合剂，如图3-17。该法修锐效果较好，用于整形较少。

此外，尚有激光修整法等，有待进一步研究开发。

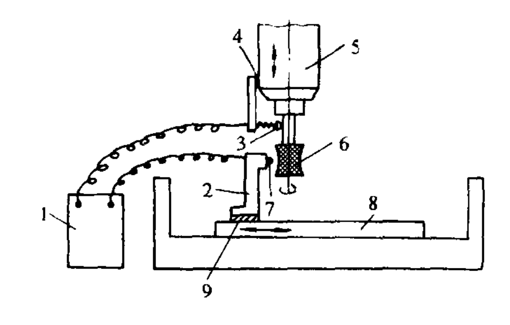


图 3-16 电火花修整法
1—电源 2—修整器 3—电刷 4—绝缘体
5—主轴头 6—金属结合剂砂轮 7—电极
8—数控工作台 9—绝缘体

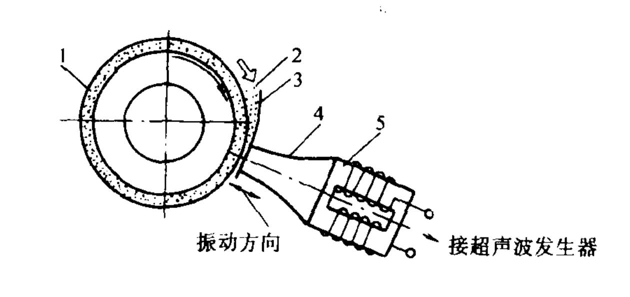


图 3-17 超声波振动修整法
1—超硬磨料砂轮 2—混油磨料 3—幅板
4—振幅放大杆 5—磁致伸缩换能器

三、超硬磨料砂轮磨床

当前，尚没有专门的超硬磨料砂轮磨床，因此大多在普通磨床或精密磨床上进行金刚石砂轮和立方氮化硼砂轮的磨削。由于超硬磨料砂轮磨削时要求加工稳定性高，振动小，因此对磨床有一些要求。

1）由于超硬磨料砂轮磨削时要求稳定性高，振动小，而且又多是精密磨削，因此要求磨床的精度较高，如砂轮主轴回转精度一般其径向圆跳动应<0.01mm，端面圆跳动<0.005mm。主轴轴承多用动压轴承或动静压组合轴承。

2）磨床必须要有足够的刚度，机床刚度的大小会影响磨削加工的稳定性，从而影响超硬磨料砂轮的耐用度和寿命，同时也影响磨削加工质量，一般要求比普通磨床刚度提高50%左右。

3）要求磨床的进给系统精度高、进给速度均匀准确，纵向进给速度最小可达0.3m/min，横向进给（切深）最小可达0.001～0.002mm/单行程，以保证磨削尺寸和形状精度，以及表面粗糙度。

4）由于超硬磨料进入机床运动件中会引起严重磨损，因此机床的各运动件如主轴回转部分、进给运动导轨部分等都应有可靠的密封，以防超硬磨料进入。

5）要有比较完善的磨削液处理系统，如要有严格的磨削液过滤装置，以防止超硬磨料对磨削液系统的磨损，而且更会影响加工表面粗糙度。

6）由于超硬磨料砂轮磨削时要求振动小，除了砂轮应精细修整、精细动平衡外，机床应置于防振地基上，采取相应的防振、隔振措施，如主电动机与机床分离安装，电动机转子进行动平衡，机床与地面接触处加防振垫等。

四、超硬磨料砂轮磨削工艺

1. 磨削用量选择

（1）磨削速度　人造金刚石砂轮一般磨削速度不能很高，根据磨削方式、砂轮结合剂和冷却情况等不同，磨削速度为12～30m/s。磨削速度太低，单颗磨粒的切屑厚度过大，不但使工件表面粗糙度值增加，而且也使金刚石砂轮磨损增加；磨削速度提高，可使工件表面粗糙度值降低，但磨削温度将随之升高，而金刚石的热稳定性只有700～800℃，因此金刚石砂轮的磨损也会增加。所以应根据具体情况选择合适磨削速度，一般平面磨削、外圆磨削、湿磨、陶瓷结合剂、树脂结合剂金刚石砂轮的磨削速度可选高些，工具磨削、内圆磨削、沟槽磨削、切断磨削、干磨、金属结合剂金刚石砂轮的磨削速度可选低些。

立方氮化硼砂轮的磨削速度可比金刚石砂轮高得多，可达45～60m/s，主要是因为立方氮化硼磨料的热稳定性好。

（2）磨削深度　根据磨削方式、砂轮粒度和结合剂和冷却情况等不同，磨削深度一般为0.002～0.01mm，粗粒度、金属结合剂砂轮可取较大的磨削深度，立方氮化硼砂轮的磨削深度可稍大于金刚石砂轮。

（3）工件速度　对磨削效果的影响较小，一般为10～20m/min，过高会使砂轮磨损增加，出现振动和噪声。

（4）纵向进给速度　可参考普通砂轮磨削选取，一般在0.45～1.5m/min，纵向进给速度对工件磨削表面粗糙度影响较大，表面粗糙度要求低时，应取小值。

2. 磨削液选择

超硬磨料砂轮磨削时，磨削液的使用与否对砂轮的寿命影响很大，如树脂结合剂超硬磨料砂轮湿磨可比干磨提高砂轮寿命40%左右，另外对磨削表面加工质量影响很大，因此一般多采用湿磨。

(1) 磨削液的作用　合理使用磨削液，可降低磨削温度，减少磨削力，改善磨削表面质量，提高磨削效率和砂轮寿命。

磨削液的基本性能有润滑性能、冷却性能和清洗性能，根据不同磨削情况的要求尚有渗透性、防锈性、防腐性、消泡性、防火性、切削性和极压性等。极压性是指磨削液与金属表面起作用，形成一层牢固的润滑膜，在磨削区域的高压下有良好的润滑和抗粘着性能。

由于超硬磨料砂轮组织紧密、气孔少、磨削过程中易被堵塞，故要求磨削液有良好的润滑性、冷却性、清洗性和渗透性。

(2) 磨削液的种类和组成　磨削液分为油性液和水溶性液两大类，油性液的润滑性能好，其主要成分是矿物油，水溶性液的冷却性能好，其主要成分是水。

油性液是以轻质矿物油为主体，如机油、轻质柴油、煤油等，掺入5%～10%的脂肪油，再加入一些添加剂：如加入极压添加剂，如硫、氯、磷等有机化合物可增强磨削液的活性，在高温下与金属表面起化学反应，生成熔点高的化学吸附膜，可减小摩擦，保持润滑作用，即有极压性。

水溶性液有乳化液、无机盐水溶液和化学合成液等。

乳化液是先由矿物油、乳化剂和防腐添加剂等配制成乳化油，使用时根据不同要求加水稀释成1%～20%浓度乳白色的水溶液。乳化剂就是表面活性剂，它是一种有机化合物，能吸附在油—水界面上形成坚固的吸附膜，使油以微小的颗粒稳定地分散水中，形成稳定的水包油（O/W）乳化液，如图3-18。一般磨削液为1%～5%浓度的水包油乳化液，它具有润滑和冷却双重性能。

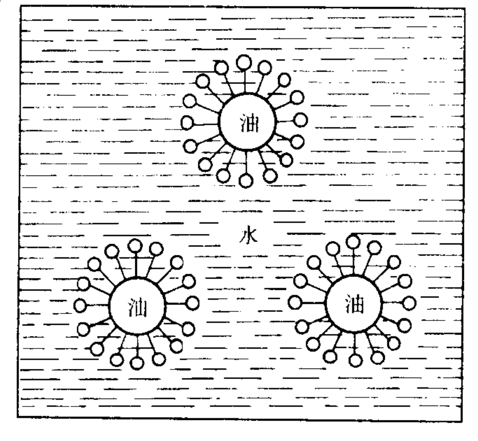


图3-18　水包油乳化液示意图

无机盐水溶液是在水中加入一定量的无机盐（磷酸盐、硼酸盐等）、链醇胺及有机防锈剂等而成，有良好的冷却性能，但润滑性能较差。这种水溶液不含或很少含极压添加剂，呈半透明状，又称透明水溶液或电解质水溶液。

金刚石砂轮磨削时常用油性液和水溶性液为磨削液，视具体情况而定，如磨削硬质合金时普遍采用煤油，但不宜使用乳化液；树脂结合剂砂轮不宜使合苏打水。

立方氮化硼砂轮磨削时采用油性液为磨削液，一般不用水溶性液，因为在高温下立方氮化硼磨粒和水会起化学反应，称水解作用，会加剧砂轮磨损。可加极压添加剂以减弱水解作用。

五、超硬磨料砂轮的平衡

超硬磨料砂轮磨削时的加工稳定性和振动对磨削表面质量影响很大，因此，必须重视砂轮的平衡问题，它不仅影响磨削质量，而且影响磨床精度保持性，又是安全工作之必需。

砂轮的平衡有两种类型

1. 静平衡

又称力矩平衡，用于窄砂轮的平衡，是在一个平面上的平衡。进行静平衡的方式有三种：

(1) 机外静平衡架上平衡　利用静平衡工具，由人工进行，不够方便。

(2) 机上动态平衡　在磨床上利用动态平衡装置对砂轮进行自动或半自动平衡，比较方便，现代的新式磨床多有动态平衡装置，其类型有液体式、电气机械式和气动机械式等。为了叙述方便，这种在砂轮工作运转情况下进行的静平衡，称之为动态平衡。

(3) 机外动态平衡　利用一种便携式力矩平衡仪，通过仪器上所带传感器对砂轮进行动态平衡，而砂轮上的平衡块是由人工进行调整的，此种方法简单易行，比机外静平衡架上平衡要快捷方便，应用逐渐广泛。

2. 动平衡

又称力偶平衡，用于宽砂轮和多砂轮轴的平衡，这时不是在一个面上而是在一个有一定长度的体上进行力偶平衡，是为动平衡。

动平衡一般都在动平衡机上进行，由仪表显示不平衡的端部（左端、右端）、相位及不平衡量，人工调整砂轮两侧的平衡块，经反复几次，将不平衡量调整到允许的数值内。

由于超硬磨料砂轮的修整一般分为整形和修锐两个过程，对用人工进行平衡时最好在整形后进行比较好。砂轮在磨削过程中有磨损，每次修整后直径减小，不时会出现不平衡状态，要及时进行重新平衡。

第四节　超精密磨削

一、超精密磨削和镜面磨削

超精密磨削是近年来发展起来的最高加工精度、最低表面粗糙度的砂轮磨削方法，一般是指加工精度达到或高于 0.1μm，表面粗糙度低于 R_a0.025μm，是一种亚微米级的加工方法，并正向纳米级发展。超精密磨削的发展远比超精密金刚石车削慢，金刚石刀具超精密切削技术的研究比较成熟，但是金刚石刀具不宜切削钢、铁材料和陶瓷、玻璃等硬脆材料。因为在切削铁碳合金时，切削所产生的局部高温使金刚石中的碳原子很容易扩散到铁素体中而造成金刚石的碳化磨损（扩散磨损）；在微量切削陶瓷、玻璃时，切应力很大，临界剪切能量密度也很大，切削刃处的高温和高应力使金刚石产生较大的机械磨损。因此，对于钢、铁材料和陶瓷、玻璃等硬脆材料，超精密磨削显然是一种重要的理想的加工方法，这就促进了超精密磨削的发展。

镜面磨削一般是指加工表面粗糙度达到 R_a0.02～0.01μm，表面光泽如镜的磨削方法，它在加工精度的含义上不够明确，比较强调表面粗糙度的要求，从精度和表面粗糙度相应和统一的观点来理解，应该认为镜面磨削是属于精密磨削和超精密磨削范畴。

超精密磨削的特点可归纳如下：

1) 超精密磨床是超精密磨削的关键　超精密磨削是在超精密磨床上进行，其加工精度主要决定于机床，不可能加工出比机床精度更高的工件，是一种“模仿式加工”，遵循“母性原则”的加工规律。由于超精密磨削的精度要求越来越高，已经进入 0.01μm 甚至纳米级，这就给超精密磨床的研制带来了很大困难，需要多学科多技术的密集和结合。

2) 超精密磨削是一种超微量切除加工　超精密磨削是一种极薄切削，其去除的余量可能与工件所要求的精度数量级相当，甚至于小于公差要求，因此在加工机理上与一般磨削加工

是不同的。

3）超精密磨削是一个系统工程 影响超精密磨削的因素很多，各因素之间又相互关连，所以超精密磨削是一个系统工程，如图 3-19。超精密磨削需要一个高稳定性的工艺系统，对力、热、振动、材料组织、工作环境的温度和净化等都有稳定性的要求，并有较强的抗击来自系统内外的各种干扰能力，有了高稳定性，才能保证加工质量的要求。所以超精密磨削是一个高精度、高稳定性的系统。

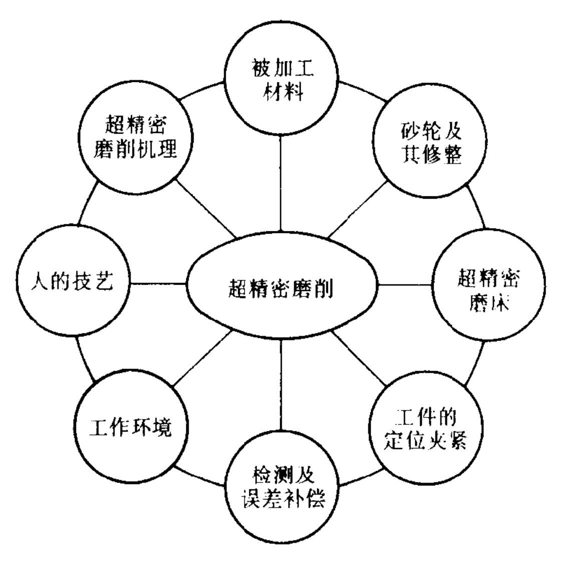


图 3-19 影响超精密磨削的因素

二、超精密磨削机理

1. 超微量切除

超精密磨削是一种极薄切削，切屑厚度极小，磨削深度可能小于晶粒的大小，磨削就在晶粒内进行，因此磨削力一定要超过晶体内部非常大的原子、分子结合力，从而磨粒上所承受的切应力就急速地增加并变得非常大，可能接近被磨削材料的剪切强度极限。同时，磨粒切削刃处受到高温和高压作用，要求磨粒材料有很高的高温强度和高温硬度。对于普通磨料，在这种高温、高压和高剪切力的作用下，磨粒将会很快磨损或崩裂，以随机方式不断形成新切削刃，虽然使连续磨损成为可能，但不得到高精度低表面粗糙度的磨削质量。因此，在超精密磨削时一般多采用人造金刚石、立方氮化硼等超硬磨料砂轮。

2. 磨削加工过程

（1）单颗粒磨削 砂轮中的磨粒的分布是随机的，磨削时磨粒与工件的接触也是无规律的，为研究方便起见，先对单颗粒的磨削加工过程进行分析。图 3-20 为单颗粒磨削的切入模型，设磨粒以切速 v、切入角 α 切入平面状工件，理想磨削轨迹是从接触始点开始至接触终点完了，但由于磨削系统的刚性，实际磨削轨迹变短，磨削深度减小。从该模型中可以说明以下几点：

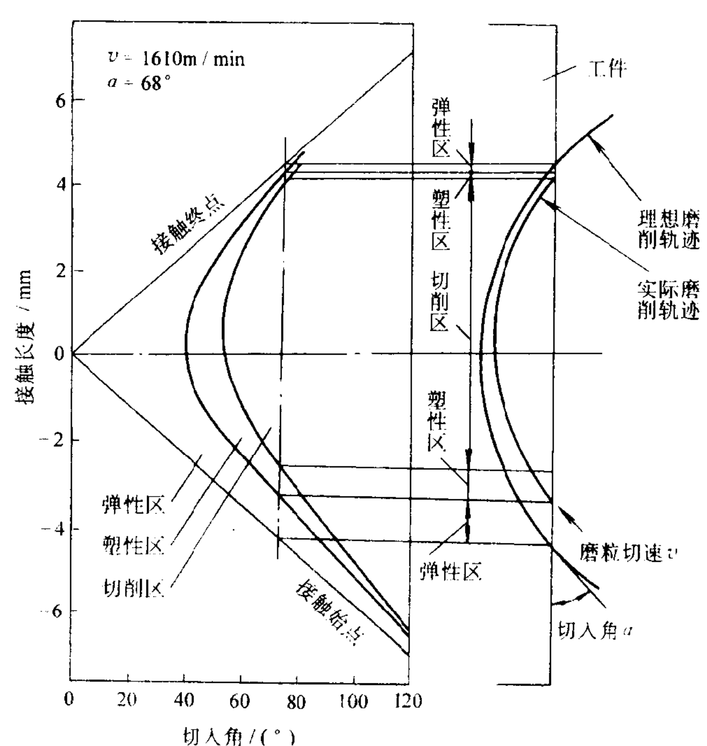


图 3-20 单颗粒磨削的切入模型

1）磨粒是一颗具有弹性支承的和大负前角切削刃的弹性体。弹性支承是指结合剂，磨粒虽有相当硬度，本身受力变形极小，实际上仍属于弹性体。

2）磨粒切削刃的切入深度是从零开始逐渐增加，到达最大值再逐渐减

少，最后到零。其切屑形状如图 3-21，图中所示为平面磨削情况。

3）磨粒磨削时在与工件的接触过程中，开始是弹性区，继而塑性区、切削区、塑性区，最后是弹性区，与切屑形成形状相符合。

4）超精密磨削时有微切削作用、塑性流动和弹性破坏作用，同时还有滑擦作用。当刀刃锋利，有一定磨削深度时，微切削作用较强；如果刀刃不够锋利，或磨削深度太浅，磨粒切削刃不能切入工件，则产生塑性流动、弹性破坏和滑擦。当然，上述的各种作用和磨削系统的刚度关系密切。

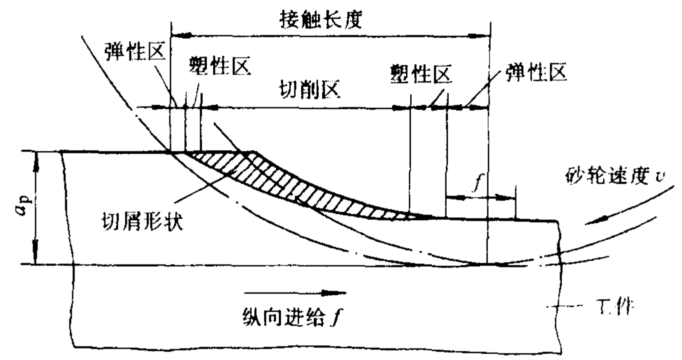


图 3-21 平面磨削时的切屑形状

（2）连续磨削 工件连续转动，砂轮持续切入，开始，磨削系统整个部分都产生弹性变形，磨削切入量（亦即磨削深度）和实际工件尺寸的减少量之间产生差值，这种差值称之为弹性让刀量。此后，磨削切入量逐渐变得与实际工件尺寸减少量相等，磨削系统处于稳定状态。最后，磨削切入量到达给定值，但磨削系统弹性变形逐渐恢复，为无切深磨削状态，或称无火花磨削状态。在超精密磨削中，掌握弹性让刀量十分重要，应尽量减小弹性让刀量，即磨削系统要求高刚度，砂轮修锐质量好，形成切屑的磨削深度小。

三、超精密磨床

1. 超精密磨床的特点

超精密磨床的特点在许多方面都与超精密车床相似，其特点如下：

（1）高精度 目前国内外各种超精密磨床的磨削精度和表面粗糙度可达到的水平为：

尺寸精度：±0.25～±0.5μm

圆度：0.25～0.1μm

圆柱度：25000：0.25～50000：1

表面粗糙度：R_a0.006～0.01μm

（2）高刚度 超精密磨床是进行超精密加工，切削力不会很大，但由于精度要求极高，应尽量减小弹性让刀量，提高磨削系统刚度，其刚度值一般应在 200N/μm 以上。

（3）高稳定性 为了保证超精密磨削质量，超精密磨床的传动系统，主轴、导轨等结构，温度控制和工作环境均应有高稳定性。

（4）微进给装置 由于超精密磨床要进行超微量切除，因此一般在横向进给（切深）方向都配有微进给装置，使砂轮能获得行程为 2～50μm，位移精度为 0.02～0.2μm，分辨率达 0.01～0.1μm 的位移。实现微进给的原理装置有精密丝杠、杠杆、弹性支承、电热伸缩、磁致伸缩、电致伸缩、压电陶瓷等，多为闭环控制系统。

（5）计算机数控 由于在生产上要求稳定进行批量生产的超精密磨削，因此，现代超精密磨床多为计算机数控，可减少人工操作的影响，使质量稳定，一致性好，且能提高工效。

2. 超精密磨床结构

超精密磨床在结构上的发展趋势如下：

（1）主轴系统 主轴支承由动压向动静压和静压发展，由液体静压向空气静压发展。空

气静压轴承精度高、发热小、稳定、工作环境易洁净，但要注意提高承载能力和刚度。

（2）导轨　多采用空气静压导轨，也有采用精密研磨配制的镶钢滑动导轨。

（3）石材部件　床身、工作台等大件逐渐采用稳定性好的天然或人造花岗岩制造。

（4）热稳定性结构　整个机床采用对称结构、密封结构、淋浴结构等热稳定性措施。

一种比较理想的新颖的四面体结构立轴超精密磨床如图 3-22 所示，它由 6 个柱连接 4 个支持球构成一个罐状的四面体，静刚度为 10N/nm，加工精度可达 1nm 以上，是由英国国立物理学实验室（NPL）开发的。

图 3-22　四面体结构立轴超精密磨床

四、超精密磨削工艺

有关超精密磨削的砂轮选择、砂轮修整、砂轮动平衡、磨削液选择等问题可参考有关精密磨削和超硬磨料砂轮磨削所述，现仅将超精密磨削时的磨削用量作一简单介绍。通常超精密磨削用量如下所列：

砂轮线速度：1860m/min

工件线速度：4～10m/min

工作台纵向进给速度：50～100mm/min

磨削深度：0.5～1μm

磨削横进给次数：2～4 次

无火花磨削次数：3～5 次

磨削余量：2～5μm

超精密磨削用量与所用机床，被加工材料，砂轮的磨粒和结合剂材料、结构、修整、平衡，工件欲达精度和表面粗糙度等有关，比较复杂，应根据具体情况进行工艺试验而决定。

超精密磨削质量与操作工人的技艺关系十分密切，应由高技术水平的工人精心细致科学地操作机床，才能达到预期效果。

第五节　精密和超精密砂带磨削

砂带磨削是一种新的高效磨削方法，能得到高的加工精度和表面质量，具有广泛的应用前景和应用范围，可以补充或部分代替砂轮磨削。

一、砂带磨削方式、特点和应用范围

1. 砂带磨削方式

砂带磨削方式从总体上可以分为闭式和开式两大类：

（1）闭式砂带磨削　采用无接头或有接头的环形砂带，通过张紧轮撑紧，由电动机通过接触轮带动砂带高速回转，工件回转，砂带头架或工作台作纵向及横向进给运动，从而对工件进行磨削。这种方式效率高，但噪声大，易发热，可用于粗、半精和精加工，如图 3-23 所示的外圆磨。

（2）开式砂带磨削　采用成卷砂带，由电动机经减速机构通过卷带轮带动砂带作极缓慢

的移动，砂带绕过接触轮并以一定的工作压力与工件被加工表面接触，工件回转，砂带头架或工作台作纵向及横向进给，从而对工件进行磨削。由于砂带在磨削过程中的连续缓慢移动，切削区域不断出现新砂粒，磨削质量高且稳定，磨削效果好，但效率不如闭式砂带磨削，多用于精密和超精密磨削中，如图 3-24 所示的外圆磨。

砂带磨削按砂带与工件接触形式来分又可分为接触轮式、支承板（轮）式、自由浮动接触式和自由接触式，如图 3-23、3-24。

按照加工表面类型来分，砂带磨削又可分为外圆、内圆、平面、成形表面等磨削方式。对于砂带外圆磨削来说，与砂轮外圆磨削一样，也有定心磨削和无心磨削，可参考图 3-23、3-24 所示。

2. 砂带磨削的特点及其应用范围

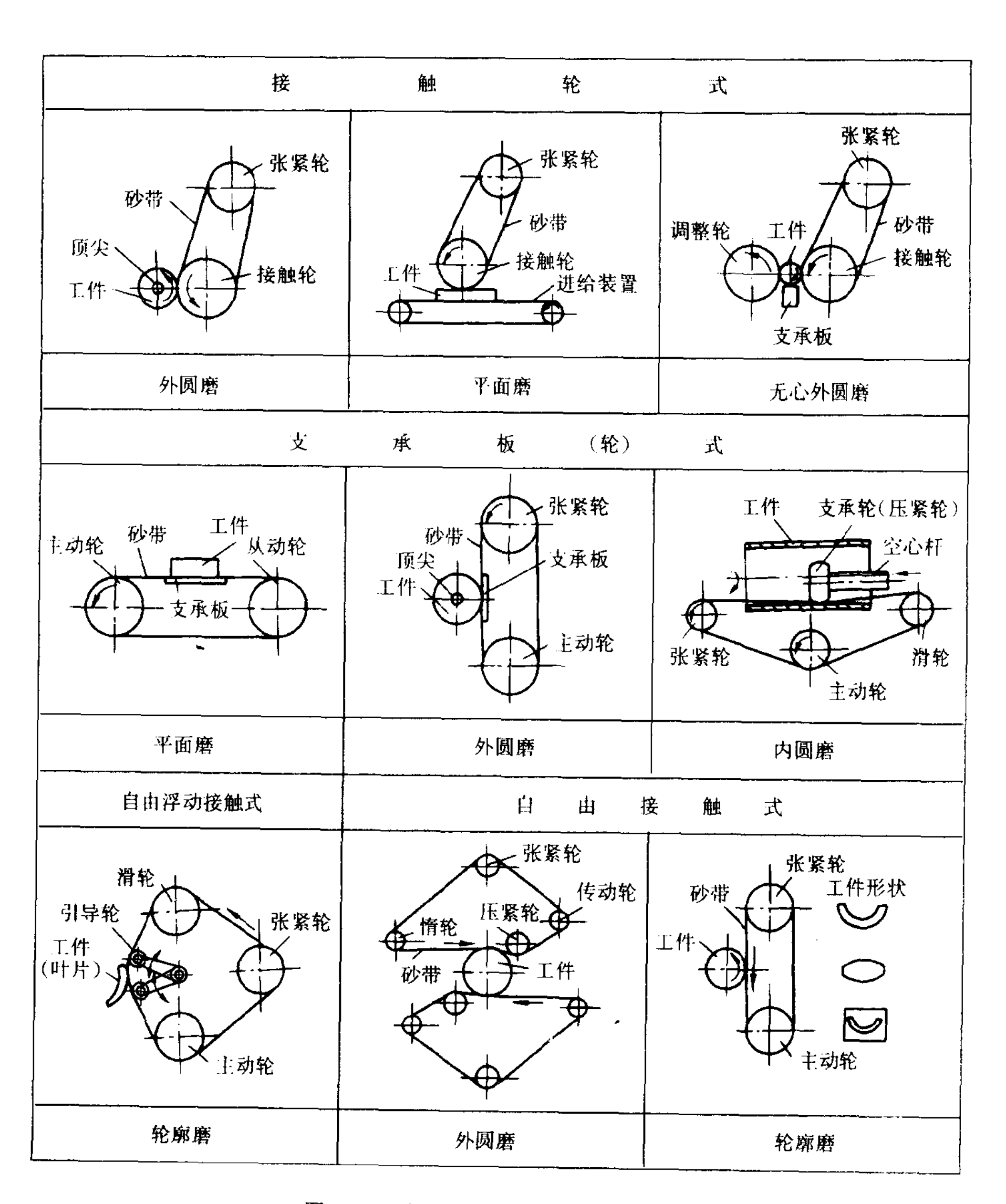


图 3-23 闭式砂带磨削的各种方式

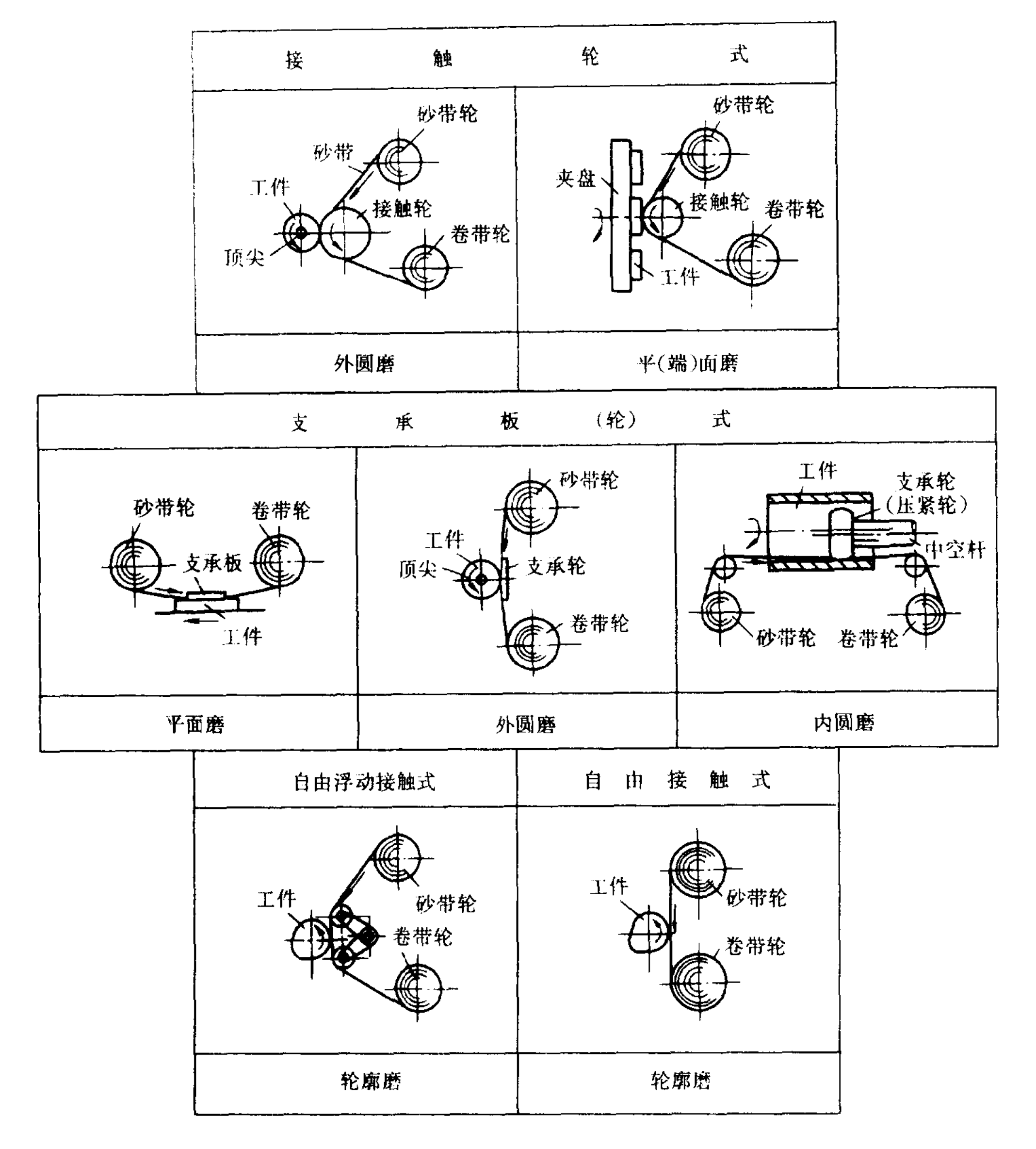


图 3-24 开式砂带磨削的各种方式

1）砂带磨削时，砂带本身有弹性，接触轮外缘表面有橡胶层或软塑料层，砂带与工件是柔性接触，磨粒载荷小而均匀，具有较好的跑合和抛光作用，同时又能减振，因此工件的表面质量较高，表面粗糙度可达 R_a0.05～0.01μm。砂带磨削又有“弹性”磨削之称。

2）砂带制作时，用静电植砂法易于使磨粒有方向性，同时磨粒的切削刃间隔长，摩擦生热少，散热时间长，切屑不易堵塞，力、热作用小，有较好的切削性，有效地减小了工件变形和表面烧伤。对于开式砂带磨削，由于不断有新磨粒进入磨削区，钝化的磨粒不断退出磨削区，磨削条件稳定，切削性能更好。工件的尺寸精度可达 5～0.5μm，平面度可达 1μm。砂带磨削又有“冷态”磨削之称。

3）砂带磨削效率高，可以与铣削和砂轮磨削媲美，强力砂带磨削的效率可为铣削的 10 倍、普通砂轮磨削的 5 倍。砂带磨削无需修整，磨削比（切除工件重量与磨料磨损重量之比）可高达 300∶1 甚至 400∶1，而砂轮磨削一般只有 30∶1。砂带磨削方法早已有之，由于基底材料强度和磨粒与基底的粘接强度有了极大的提高，才使得砂带磨削焕发新生，有了“高效”磨削之称。

4）砂带制作比砂轮简单方便，无烧结、动平衡等问题，价格也比砂轮便宜。砂带磨削设备结构简单，可制作砂带磨床或砂带磨削头架，后者可安装在各种普通机床上进行砂带磨削工作，使用方便，制造成本低廉。

5）砂带磨削有广阔的工艺性和应用范围，可加工外圆、内圆、平面和成形表面。砂带磨削头架可安装在卧式车床、立式车床、龙门刨床等普通机床上进行磨削加工。因此有很强的适应性。砂带不仅可加工各种金属材料，而且可加工木材、塑料、石材、水泥制品、橡胶等非金属材料，此外，还能加工硬脆材料，如单晶硅、陶瓷和宝石等。开式砂带磨削加工铜、铝等软材料表面效果良好，独具特色。

近年来出现了砂带研抛加工，它是一种精密和超精密加工方法，其加工为开式砂带磨削方式，用细粒度砂粒聚酯薄膜基底砂带。如果采用接触轮外缘材料为橡胶、塑料等时，加工时的抛光作用强，能有效减小表面粗糙度；如果采用接触轮外缘材料为钢铁、铜、胶木等较硬物质，加工时的研磨作用强些，抛光作用弱些，能够减小表面粗糙度，对精度也会有所提高；如果所采用接触轮外缘材料半软半硬，如一定硬度的橡胶和塑料，则研磨、抛光兼有，故称砂带研抛。由于在聚酯薄膜基底上所涂覆的一层细粒度砂粒（一般为微粉）和粘接剂非常薄，形如薄膜，故又有“研磨膜”或“抛光膜”之称。这种砂带研抛实际上是砂带精密磨削或砂带超精密磨削的一种方式，已用来加工精密磁头，高密度硬磁盘涂层表面等精密元件的加工，效果十分良好，应用十分广泛。

当前，对于窄退刀槽的阶梯轴、阶梯孔、盲孔、小孔、齿轮等，砂带磨削尚不能加工。对于精度要求很高的工件，特别是形状和位置精度上，砂带磨削也还不如精密砂轮磨削。

二、砂带磨削机理

砂带磨削时，砂带经接触轮与工件被加工表面接触，由于接触轮的外缘材料一般是一定硬度的橡胶或塑料，是弹性体；同时砂带的基底材料是纸、布或聚酯薄膜，也有一定的弹性，因此在砂带磨削时，弹性变形区的面积较大，使磨粒承受的载荷大大减小，载荷值也较均匀，且有减振作用。图 3-25 表示了砂轮磨削和砂带磨削的接触区和载荷分布情况。可见砂带磨削时材料的塑性变形和摩擦力均较砂轮磨削时减小，力和热的作用降低，工件温度降低。砂带粒度均匀、等高性好，磨粒尖刃向上，有方向性，且切削刃间隔长，切屑不易堵塞，因此有较好的切削性。这些都使得加工表面能得到很高的表面质量，但对提高工件的几何精度带来了一定困难。

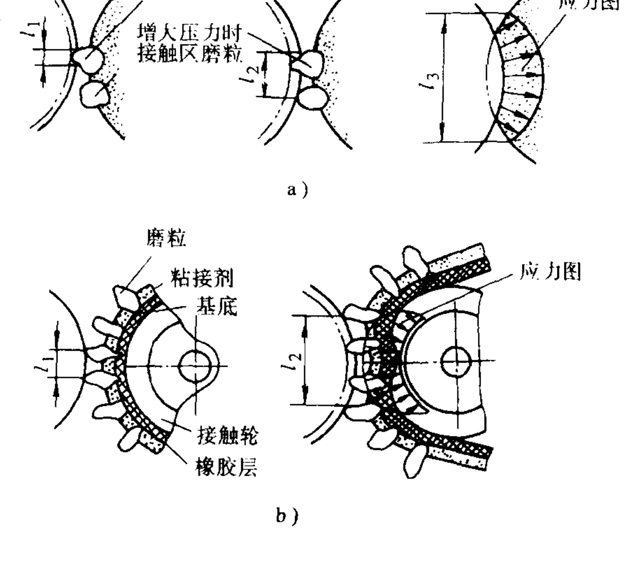


图 3-25 砂轮磨削和砂带磨削过程

a）砂轮磨削 b）砂带磨削

l_1—接触区起始长度 l_2—压力增大时接触区长度

l_3—应力区长度

砂带磨削时，除有砂轮磨削的滑擦、耕犁和切削作用外，由于有弹性，还有磨粒的挤压使加工表面产生的塑性变形、磨粒的压力使加工表面产生的加工硬化和断裂、以及因摩擦升温而引起的加工表面热塑性流动等，因此从加工机理来看，砂带磨削兼有磨削、研磨

和抛光的综合作用，是一种复合加工。

对于精密和超精密砂带磨削，闭式砂带磨削方式和开式砂带磨削方式都有，但主要是开式砂带磨削方式。加工时多采用细粒度砂粒，甚至是细粒度微粉，基底材料为厚度0.06～0.12mm的聚酯膜或复合材料膜。但在加工机理上没有什么不同，只是各个作用的比例可能有所变化，与接触轮的外缘状态关系密切。

从总的效果来看，砂带磨削在提高加工表面质量，特别是降低表面粗糙度上效果比较明显，但在提高加工精度上可以做到略有提高。精密加工和超精密加工对精度和表面质量均要求很高，因此砂带磨削时如何提高其加工精度应在机理和实践上进行进一步研究，其意义是很大的。

三、精密砂带磨床和砂带头架

砂带磨削是在系列生产的砂带磨床上进行的，与普通砂轮磨床的结构一样，砂带磨床也有床身、工作台、主轴箱、砂带头架等，所不同者，主要是在砂轮头架上，一般来说，将普通磨床的砂轮头（架）换上砂带头（架）就可改装为砂带磨床。砂带磨床上的关键部件是砂带头架，现就砂带磨削头架进行阐述。

1. 砂带磨削头架

砂带磨削方式不同，砂带磨削头架的结构各异，可分为闭式磨削头架和开式磨削头架两大类。

（1）闭式磨削头架　主要由接触轮（或支撑板）、主动轮、张紧轮、张紧机构、调偏机构、电动机、基座等构成。其传动特点与平皮带传动类似，砂带由张紧轮和张紧机构张紧，运动由电机经主动轮、直接传到接触轮，或经皮带、皮带轮传到接触轮，再由接触轮带动砂带运动。为保证砂带正常工作，各传动轴线应平行，各传动轮的外缘边上应有一定高度的凸缘，防止砂带跑偏。图3-26为一磨削外圆的闭式磨削头架，图3-27为一磨削内圆的闭式磨削头架。

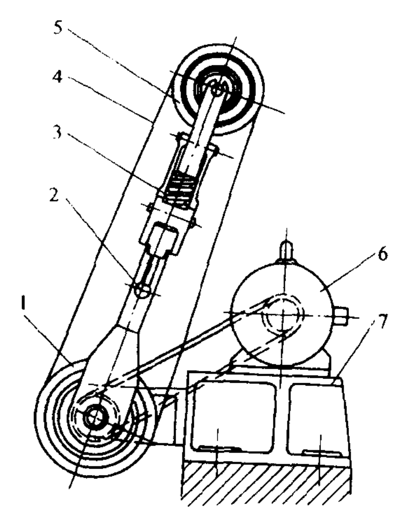


图3-26　闭式砂带磨削外圆头架

1—接触轮　2—张紧手柄　3—张紧弹簧　4—砂带　5—张紧轮　6—电动机　7—基座

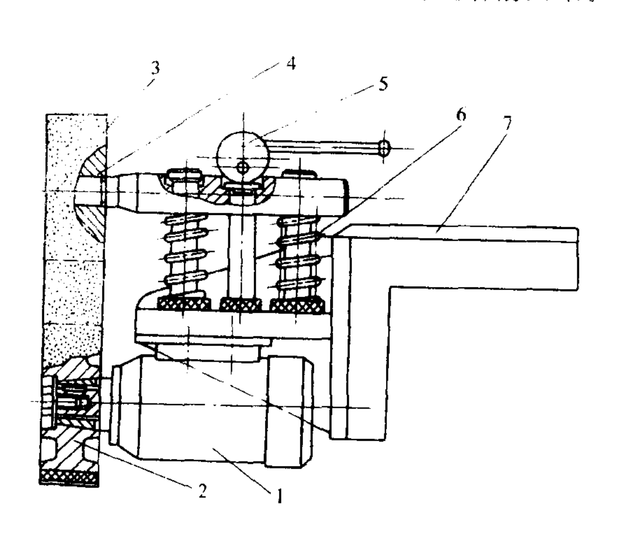


图3-27　闭式砂带磨削内圆头架

1—电动机　2—主动轮　3—砂带　4—接触轮　5—张紧凸轮　6—张紧弹簧　7—夹持座

（2）开式磨削头架　开式砂带磨削是用卷状砂带，故其头架结构与闭式砂带磨削头架大不相同，它是由卷带轮、接触轮、砂带轮、电动机、基座等构成。整卷砂带放置在砂带轮上，

砂带经接触轮绕于卷带轮上，动力由电动机经减速及调速装置带动卷带轮缓慢转动，并由卷带轮带动砂带作缓慢移动，砂带轮轴系上的摩擦机构所产生的摩擦力使砂带撑紧。某些传动轮外缘边上有一定高度的凸缘，防止砂带跑偏。图 3-28 是一种磨削外圆或平面的开式磨削头架，它由直流力矩电动机经减速箱带动卷带轮作正反转，可无级调速，视砂带需要的移动速度而调整；砂带轮轴上的碟形弹簧机构所产生的摩擦阻尼使砂带在移动中保持撑紧；移动油缸经杠杆使接触轮移向（或离开）工件，并保持一定的接触压力。移动速度和压力大小由液压调整。卷状砂带装在砂带轮上，通过斜面撑紧机构，由三条滑块撑紧，只要拧紧或松开带锥面的螺母，便可以方便装上或卸下砂带。一般砂带设置在上方，卷带轮设置在下方，以易于保持砂带的洁净。砂带轮和接触轮均应设置在人工操作方便的地方，并应方便更换。

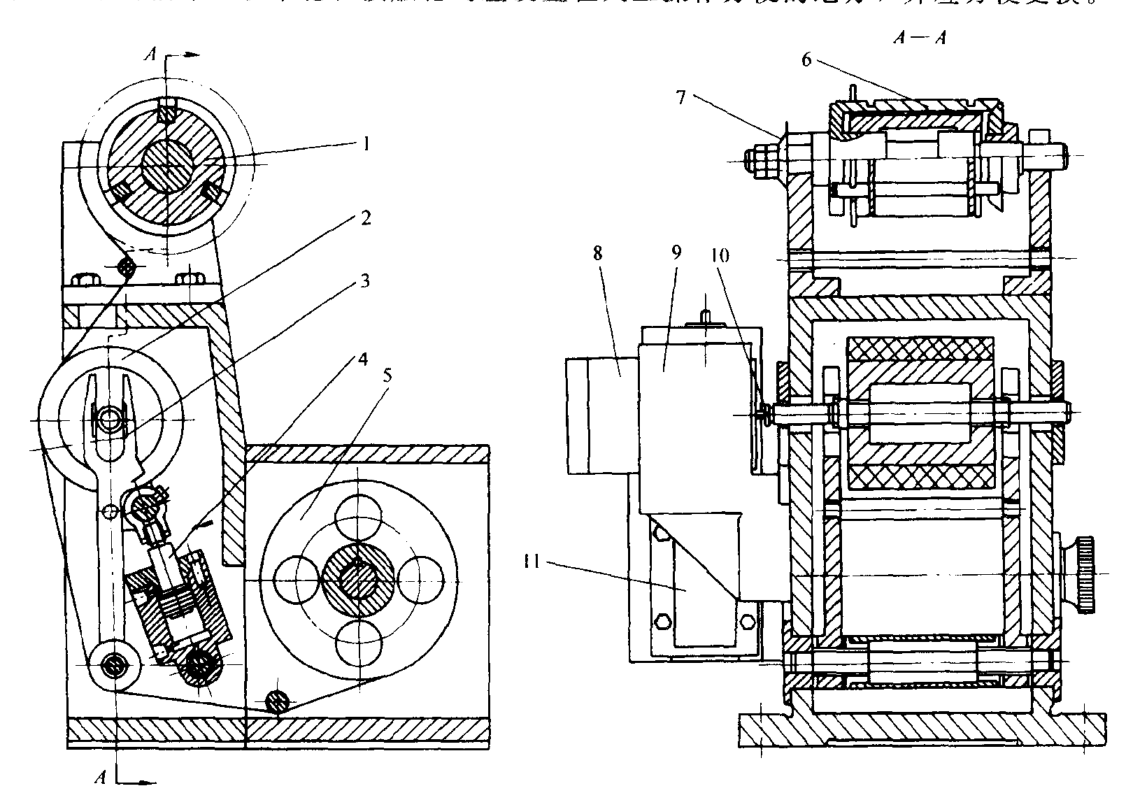


图 3-28　开式砂带磨削头架

1—砂带轮　2—接触轮　3—杠杆　4—移动油缸　5—卷带轮　6—卷状砂带撑紧机构　7—碟形弹簧　8—激振器　9—直流力矩电机　10—联轴节　11—减速箱

卷状砂带有各种宽窄规格尺寸，图 3-28 中所示为宽砂带开式结构，结构上复杂些。

近年来，出现了砂带振动磨削，它是将开式砂带磨削和振动叠加起来形成的一种复合加工。一般振动是叠加在接触轮的轴向方向，振动的作用很重要，可归纳如下：

1）在开式砂带磨削时，振动可以弥补工件不能高速运动时的效率下降，使加工效率大大提高。

2）振动的叠加可以形成复杂而又不重复的磨削轨迹，形成网状纹路，有利于降低表面粗糙度，得到很低的粗糙度值加工表面。

3）由于振动的作用，可以采用干式磨削，加工表面不易出现划痕，对加工软材料非常有利。

4）对于宽砂带，沿接触轮轴向振动可使砂带不跑偏和磨损均匀。

图 3-28 所示即为开式砂带振动磨削头架，由电动式激振器通过一特殊联轴节带动接触轮作沿其轴向的振动，激振器由低频信号发生器和功率放大器控制，频率、振幅和激振力均可无级调整。

2. 接触轮

在砂带磨削头架中，最重要而关键的零件是接触轮，其基本结构如图 3-29，轮毂和外缘是由不同材料制成，一般轮毂用钢铁制造，外缘视磨削要求不同，可选用钢、铜、橡胶等材料。接触轮的主要参数有外缘材料、硬度、表面形状及尺寸等。

接触轮外缘表面形状有平滑形、标准齿形、宽齿形和交叉齿形 4 种，如图 3-30。有齿形的表面，其螺旋角又有 90°、45°、30°和 0° 4 种，一般多选用 30°～60°之间，30°用于精磨，45°～60°用于粗磨，如图 3-29。接触轮外缘截面形状有平滑形，齿形和填充形 3 种结构，见表 3-6。

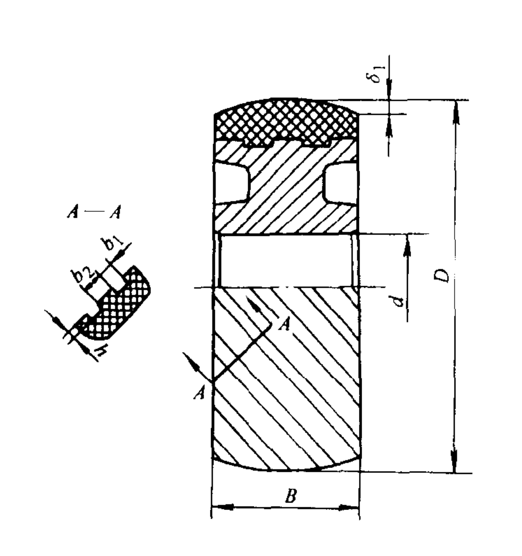


图 3-29 接触轮的基本结构

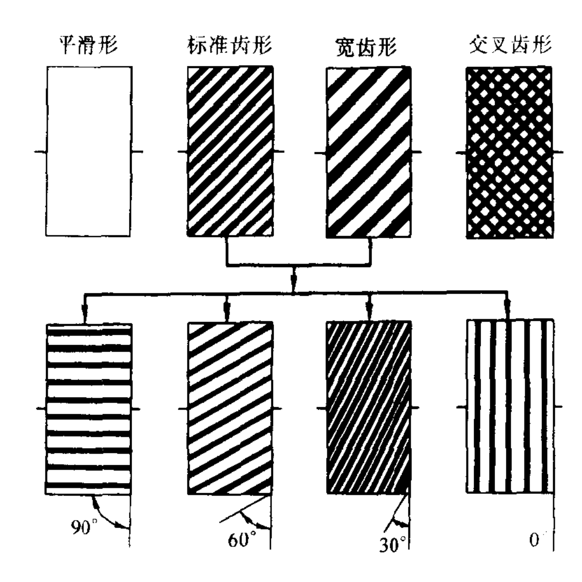


图 3-30 接触轮外缘表面形状

表 3-6 接触轮外缘截面形状及其结构

类型	外缘截面形状及其结构	用途	类型		外缘截面形状及其结构	用途
平滑形		细粒度砂带精磨、精密和超精磨及研抛	齿形	矩齿形		粗磨 精磨
填充形	Cu或Al 橡胶	粗磨	齿形	锯齿形		粗磨

各种接触轮外缘类型、材料、硬度及其特点和用途如表 3-7 所示，对于精密和超精密磨削加工，外缘材料多用橡胶、聚氨酯等，且多用平滑形外缘表面。

表 3-7 各种接触轮外缘类型及其特点和用途

类　型	外缘材料	硬　度	特　点	用　途
交叉齿形 标准螺旋齿形	钢	52～55HRC	切入作用强，不易变钝	重负荷磨削
宽齿形	橡胶	70～90HS-A	切速快，砂带寿命长	重负荷磨削 切除毛坯焊渣、浇冒口残留物
标准齿形		30～95HS-A	可获中等粗糙度加工表面砂带寿命很长	中负荷磨削
交叉齿形		30～70HS-A	砂带能进入工件轮廓的成形曲面进行仿形磨削	轻负荷磨削，研抛磨削成形表面
平滑形	橡胶	40～95HS-A	可有效控制磨削深度	轻负荷磨削，研抛，低表面粗糙度磨削
	胶木	100HBS	砂带切削作用强能提高几何精度	中负荷磨削
	聚氨基甲酸酯	65～80HS-A	砂带寿命长能保持工件原有几何精度	轻负荷磨削，中负荷磨削
柔软型	压制帆布	软、中、硬	砂带寿命长 切除率较高	中负荷磨削，抛光
	涂橡胶帆布	中等	成形性能好 切除率较高	成形磨削，成形抛光
	实心层压帆布	软、中、硬	磨削表面光整均匀，不留磨痕，价格低廉	成形磨削，成形抛光
	软皮硬心帆布	柔软	适于精加工 成本低廉	轮廓抛光，精抛
充气胎	充气橡胶	特软	能进入工件轮廓，加工表面粗糙度均匀	轮廓抛光，精抛
泡沫塑料	聚氨酯	极软	最柔软，能进入工件轮廓	复杂形面抛光，精抛

3. 其它元件

(1) 主动轮　为增大轮与砂带之间的摩擦力，也采用外缘与轮毂为不同材料的组合结构，外缘材料一般为橡胶，并在轮缘上沿回转方向开出平行的环形沟槽，以避免运行中砂带憋气。

(2) 张紧轮及张紧机构　为使砂带磨削时能正常稳定地传递动力，以保证磨削，砂带必须张紧。张紧时可通过张紧轮及张紧机构产生张紧力，张紧轮的结构与主动轮相同，必须压在砂带的从动边上。也可采用接触轮或主动轮直接张紧。

张紧时，张紧轮压在砂带背面为内部张紧，张紧轮压在砂带砂面为外部张紧。一般多采用内部张紧方式，外部张紧时因系滚动摩擦，轮面磨损并不严重。

张紧机构可分为周期性张紧和自动张紧两类。周期性张紧多用螺纹、蜗杆副等，自动张紧多用弹簧、配重、气、液等装置。

(3) 调偏机构　调偏机构的作用是为了防止砂带在运动中跑偏。调偏机构多采用机械结构调整接触轮、张紧轮等的轴线位置来导引砂带的运动。砂带跑偏会影响砂带正常工作，应当重视。

(4) 振荡装置　为了使砂带磨损均匀，降低加工表面粗糙度值，有时要设计振荡装置使砂带在运动过程中沿接触轮轴向产生往复位移。对于宽砂带磨削和横向进给磨削，砂带振荡更为需要。

四、精密砂带磨削工艺

1. 砂带磨削用量选择

(1) 砂带速度　对于闭式磨削，粗磨时一般选 12～20m/s；精磨时一般选 25～30m/s，砂带速度与被磨工件材料有关，对难加工材料应取低值，对非金属材料可取高值。

(2) 工件速度　工件速度高些可减少或避免工件表面烧伤，但会增加表面粗糙度值，一般粗磨选择 20～30m/min，精磨取 20m/min 以下。对于开式磨削，由于砂带速度非常低，为提高效率，可适当选高些，但要满足表面粗糙度要求。

(3) 纵向进给量及磨削深度　粗磨时，纵向进给量为 0.17～3.00mm/r，磨削深度为 0.05～0.10mm。

精密时，纵向进给量为 0.40～2.00mm/r，磨削深度为 0.01～0.05mm。

(4) 接触压力　接触压力直接影响磨削效率和砂带寿命，可根据工件材料、砂带、磨削余量和表面粗糙度要求来选择，接触压力有时很难控制，一般选取 50～300N。

2. 砂带选择及其修整

根据被加工材料、加工精度和表面粗糙度要求等来选择砂带，其中包括磨料种类、粒度、基底材料等。对于砂带磨削来说，一般没有修整问题，但在精密和超精密磨削时，为了保证加工质量，新砂带在使用前，可进行一次修整（或预处理），主要是改善磨粒的等高性，避免少数凸出的磨粒划伤工件表面，使砂带一开始就进入正常磨损的最佳阶段，这对提高加工表面质量十分有效，修整方法如下：

(1) 滚压法　使砂带通过一对有相应间隙的淬火钢制平滑滚轮，砂带受压将凸出磨粒压平而获得等高性。要求高时可经过不同间隙的多对滚轮滚压。

(2) 对磨法　用一细粒度砂带与欲用的新砂带对磨，将其凸出磨粒修整掉。此法也可用两条新砂带对磨来修整。对磨时要求接触压力很小，不会使砂带钝化或磨粒脱落。

(3) 预磨法　将新砂带使用一段时间后，待砂带处于正常磨损的最佳阶段时备用。这种方法有时不易掌握，要求预磨后的砂带清洁，磨粒间空间不得粘有切屑等杂物。

精密和超精密砂带磨削时，砂带的修整应作为制作中的最终工序，比较合理，质量易于保证，使用也比较方便。

3. 砂带磨削的冷润与除尘

砂带磨削时分干磨与湿磨两种。

(1) 磨削液与干磨剂的选择　湿磨时，磨削液的选择除考虑加工表面粗糙度、被加工材料等外，必须要考虑砂带粘接剂的种类，因为它们多属无机物，易受化学溶剂的影响。另外，还应考虑基底材料。

干磨时，当粒度号大于 P150 时，可采用干磨剂，可有效防止砂带堵塞。

各类磨削液及干磨剂的选择可参阅表 3-8 所列。

表 3-8　砂带磨削时各类磨削液及干磨剂的选择

种类		性能	使用范围
油性液	矿物油	磨削性能好	非铁金属
	混合油	润滑性能好，无腐蚀	金属精密和超精磨削
	硫化氯化油	磨削性能好	钢、铁、不锈钢等粗磨
水溶性液	乳化液	润滑性能好，价格便宜	金属磨削
	无机盐水溶液	冷却和浸透性能好、防锈性能好	金属精密磨削
	化学合成液	冷却和浸透性能好	金属高速磨削、精密磨削
固态脂、蜡助剂		可有效防止砂带阻塞	用细粒度砂带干磨各种材料
水		冷却性能好	玻璃、石料、塑料、橡胶等

（2）砂带磨削的除尘　无论是湿磨还是干磨，无论是在砂带磨床磨削还是在普通机床上利用砂带磨削头架磨削，都应设有吸尘和集尘装置。可用封闭罩或吸尘管等结构将磨削液、切屑、磨粒等汇集于集尘箱内，通过过滤回收，磨削液再用；干磨时则不必回收。

复习思考题

3-1　何谓固结磨料加工？何谓游离磨料加工？它们各有何特点？适用于什么场合？

3-2　试述超硬磨料磨具（金刚石砂轮、立方氮化硼砂轮）的特点。超硬磨料磨具为什么会成为精密加工和超精密加工的主要工具之一？

3-3　在表示普通磨料磨具和超硬磨料磨具的技术性能时，有哪些技术性能的表示方法相同？有哪些技术性能的表示方法不同？为什么？

3-4　为什么在超硬磨料磨具的结构中一般由磨料层、过渡层和基体三个部分组成？过渡层起什么作用？普通磨料磨具的结构为什么与超硬磨料磨具的结构不同？

3-5　涂覆磨具在制造技术上的质量关键是哪些？

3-6　试述近年来涂覆磨具在精密和超精密加工中所占的地位。

3-7　试述涂覆磨具制造中三种涂覆方法的特点和应用场合。

3-8　试从系统工程的角度分析精密磨削的技术关键。

3-9　试分析砂轮修整对精密磨削的质量的影响。

3-10　精密磨削能获得高精度和低表面粗糙度值的主要原因何在？

3-11　试分析超硬磨料砂轮的各种修整方法的机理、特点和应用范围。

3-12　试分析普通磨料砂轮和超硬磨料砂轮在修整机理上的不同。

3-13　在超硬磨料砂轮磨削时如何选用磨削液？

3-14　超精密磨削的含义是什么？镜面磨削的含义是什么？

3-15　试从系统工程的角度来分析超精密磨削能达到高质量的原因。

3-16　试比较精密砂轮磨削和精密砂带磨削的机理、特点和应用范围。

3-17　比较闭式砂带磨削和开式砂带磨削的特点和应用场合。

3-18　论述接触轮外缘截面形状及其结构对砂带磨削的影响。

3-19　分析接触轮外缘材料的种类及其硬度对砂带磨削的影响。

3-20　如何处理砂带磨削时的冷润与除尘问题。

第四章　精密和超精密加工的机床设备

第一节　精密和超精密机床发展概况

一、精密和超精密机床的发展情况

精密机床是实现精密加工的首要基础条件，随着加工精度要求的提高和精密加工技术的发展，机床的精度不断提高，精密机床和超精密机床亦获得了迅速的发展。

金属切削机床起源于18世纪，当时英国瓦特发明了蒸汽机，但是缺乏加工制造手段。发明后第五年，Wilkinson研制成功了一台卧式镗床，使蒸汽机的缸体能够加工，使瓦特的梦想成为现实。从这时代起开始了正规的机械加工，发展了各种金属切削机床。随着机械制造技术的发展提高，机床的品种不断增多，性能和精度不断提高。到第二次世界大战前后精密机床的发展已逐渐完善成熟，精密车床和精密磨床的主轴回转精度已经达到微米级、坐标镗床、坐标磨床、齿轮磨床、螺纹和蜗杆磨床、三坐标测量机等均已在生产中得到广泛的应用，达到很高的精度。例如：国际上素负盛名的瑞士Schaublin、西德的Boley、美国Hardinge公司等的精密车床主轴回转精度在1μm以下，实际进行测定，多数机床主轴振摆在0.4～0.5μm左右，直线度可达＜1μm/100mm。瑞士Studer、美国Brown Sharp公司的精密磨床磨出工件圆度可达0.5～1μm。精密坐标镗床和坐标磨床的定位精度可达1～3μm。

第二次世界大战后的50年代末期，随着国防工业和尖端技术发展的需要，美国首先发展了金刚石刀具超精密切削技术，当时称为“SPDT技术”（Single Point Diamond Turning）或“微英寸技术”（1微英寸＝0.025μm）。为此发展了空气轴承主轴的超精密车床。30年来美国为了国防和尖端技术的需要，在这方面投入了巨额的资金和大量的人力和物力，研究开发超精密切削用机床，超精密机床是综合性新技术的结晶。它综合应用多项近代新技术于精密机床，使精密机床产生质的飞跃。近年来，这项技术发展很快，现在已达到很高的水平。到80年代，超精密切削技术在民用产品中亦得到应用，如加工计算机的磁盘、复印机的硒鼓、录像机磁鼓、激光打印机的多面棱镜等，要求发展高生产率的中小型超精密机床。现在美国和日本均各有20多家工厂和研究所生产超精密机床，其他英国、荷兰、德国等也都有工厂研究所生产和研究开发超精密机床，也都已达到较高的水平。

现在美国超精密机床的水平最高，不仅有不少工厂生产中小型超精密机床，而且由于国防和尖端技术的需要，研究开发了大型超精密机床，其代表是Lawrence Livermore国家实验室（LLL或LLNL）于1983～1984年研制成功的DTM-3和LODTM大型金刚石超精密车床，这两台机床是现在世界公认的水平最高的、达到当前技术最前沿的大型超精密机床。

英国是较早从事精密和超精密加工技术研究的国家之一。英国Cranfield Precision Engineering公司（CUPE）以其精加工技术闻名于世，曾生产HATC 300等超精密车床。1991年Cranfield公司研制成功用于加工X射线天体望远镜用反射镜的2.5m×2.5m大型超精密机床，可用于精密磨削和坐标测量。这是迄今第二个能制造这样大的大型超精密机床的

单位。

日本研究超精密切削技术和研制超精密机床虽起步较晚，70 年代中期才开始，但是由于得到有关方面的重视和协同努力，发展很快，现在在中小型超精密机床生产上，已基本上和美国并驾齐驱。

二、超精密机床进一步发展的规划

1. 美国 POMA 计划要求的精度

美国 Union Carbide 公司、Moore Special Tool 公司和美国空军兵器研究所一起制订了一个以 0.1μm 形状精度，加工直径为 800mm 的大型球面光学零件超精加工的规划一举世闻名的 POMA 规划 (Point One Micrometer Accuracy)。它对机床提出了极严格的要求。表 4-1 是这 POMA 规划对精度的具体要求，精度要求甚高，现在正在逐步实现。

2. 日本提出的“超超精密机床”规划

日本打算在现在超精密机床的精度基础上，再进一步规划更高精度的机床。按日本的提法，也就是研制“超超精密机床”。表 4-2 是日本提出的该规划的各项指标。

该计划主要围绕提高超精密机床精度性能而提出的设想，共有 13 个子课题，计划在本世纪内完成。该计划是以纳米级精度作为目标的。

表 4-1 美国 POMA 规划的要求精度

(μm)

	精度内容	现在精度	目标精度
1	位置检测精度	0.1	0.01
2	定位精度	0.5	0.05
3	Yaw,Pitch,Roll	1.0	0.02
4	直线度	0.25	0.02
5	轴向回转振摆	0.1	0.02
6	径向回转振摆	0.1	0.02
7	主轴伸长	0.25	0.05
8	主轴驱动	0.5	0.01
9	热变形	0.5	0.05
10	工件夹持	0.5	0.05
	共　计	1.5	0.1

表 4-2 日本提出的“超超精密机床”精度规划

序号	研究开发课题(小课题)	1985年	1990年	1995年	2000年
1	nm 级直线导轨结构				
2	nm 级回转机构				
3	nm 级定位装置				
4	高精度微位移装置				
5	nm 级尺寸测量方法				
6	nm 级表面粗糙度和形状测量				
7	超超精密加工机械的隔振				
8	超超精密加工机械热变形补偿机构				
9	加工的大气、环境精密控制				
10	极小磨损的滑动面				
11	可能作到 nm 级精度的一般物质材料				
12	nm 级电、化学、光加工				
13	含金刚石的高性能和新工具材料				

3. 中国精密机床和超精密机床的发展情况

我国在 60 年代起即开始发展精密机床，经过近 30 年的努力，我国的精密机床已有相当规模，不仅品种上基本满足我国生产需要，而且精度质量上达到一定的水平。例如昆明机床厂、宁江机床厂和汉川机床厂生产多种坐标镗床，有立式的并且有卧式的，最新的坐标镗床已有精密数控系统。坐标镗床的定位精度在 3～5μm。宁江机床厂现又生产 MK2932B 连续轨迹数控坐标磨床，工作台面积 320mm×600mm，定位精度±2μm。重床机床厂生产高精度滚齿机、武汉

重型机床厂生产大型高精度滚齿机。重庆机床厂、武汉机床厂、上海机床厂等均研制成功高精蜗轮母机，使加工的蜗轮精度明显提高。上海机床厂和秦川机床厂生产多种磨齿机，其中Maag 型磨齿机可加工 4～5 级精度的齿轮，汉中机床厂生产螺纹磨床和高精度蜗杆磨床。国内现在有多家工厂生产三坐标测量机，其中北京机床研究所、航空精密机械研究所，前哨机械厂等都已批量生产多种规格的三坐标测量机，据用户反映性能良好。

1987 年北京密云机床研究所研制成功加工球面的 JSC-027 型超精密车床。该机床采用空气轴承主轴，最大加工直径 ϕ400mm，后来又研制成功 JCS-031 型超精密铣床，JSC-035 型数控超精密车床。北京航空精密机械研究所研制成功空气轴承主轴的超精密车床和金刚石镗床，该研究所用花岗岩制造精密空气轴承主轴，使用性能良好。哈尔滨工业大学研制成功带激光在线测量的空气轴承主轴数控超精密车床，性能良好。

我国超精密机床的生产和研制，实际是现在才开始，和国外的差距甚大。由于这项新技术直接影响国防和尖端技术的发展、尖端技术产品的生产，有着极大的重要性。要从国外引进又受保密、禁运的限制，必须自己开发研究，因此必须给予充分的重视。应该投入充分的人力、物力、给予充分的财力支持，大力加强我国自己的开发研究工作，使我国的超精密加工技术和超精密机床能够得到加速发展。

第二节　典型超精密机床的简介

下面介绍超精密机床发展过程中的一些典型的、有代表性的机床，它也代表了超精密加工技术和超精密机床的发展过程。美国开发研制超精密机床最早、发展过程最完整、现在的水平也最高，因此下面简介的典型超精密机床也以美国的超精密机床为主。

一、Union Carbide 公司的半球车床（1 号车床）

1962 年美国联合碳化物（Union Carbide）公司研制成功半球车床。图 4-1 给出了这台空气轴承主轴的车床的外形构造。它能加工 ϕ100mm 的半球，达到尺寸精度 $\pm 0.6\mu m$，表面粗糙度 $R_a = 0.025\mu m$。这是最早期的使用金刚石刀具实现超精密镜面切削的机床。

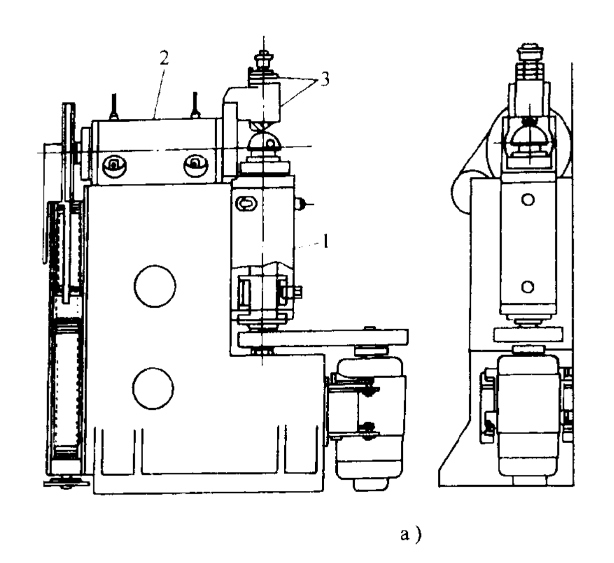
图 4-1b 中为这台车床的精密空气轴承主轴的结构。它采用多孔石墨制成轴衬，径向空气轴承的外套可以调整自动定心，可提高前后轴套的同心度，以提高主轴的回转精度。这轴承的回转精度达到 $0.125\mu m$。

二、Moore 车床

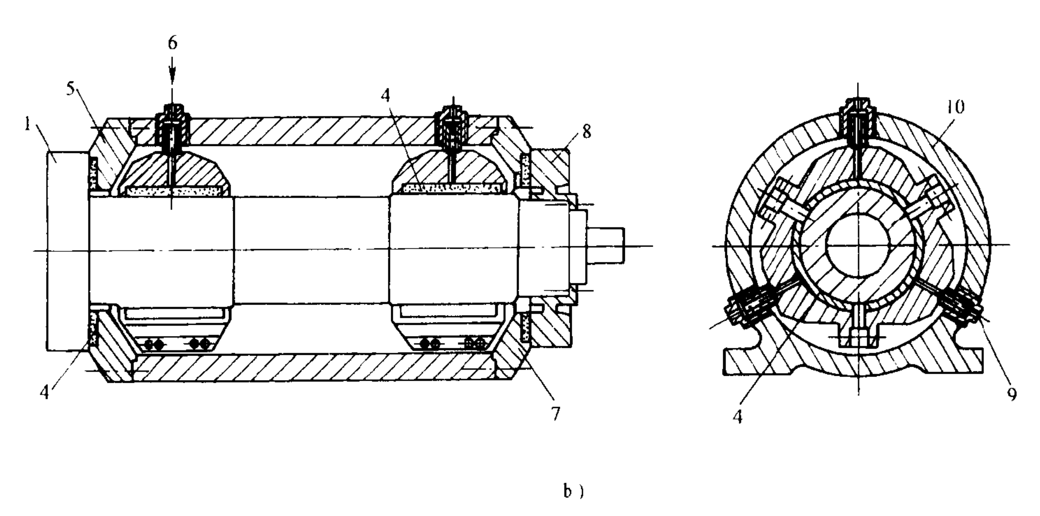
美国 1968 年发展了 Moore 车床。它是在有效的使用了上述两种试制机床的技术基础上，改造了 Moore 3 型坐标测量机而研制成功的。

图 4-2 为这种机床的结构外形。机床采用卧式主轴，使用了和 1 号车床相同结构的空气轴承主轴，以保证达到很高的加工精度。机床具有三坐标精密数控，即工作台的 x、z 方向和回转工作台的 B 向。金刚石刀具装在精密回转工作台上，在加工各种非球曲面时，刀具将垂直于加工表面，以提高所加工的非球曲面的精度和表面质量。这种机床对机床结构和性能做了较多改进，如提高了导轨的直线度，溜板导轨和主轴的垂直度，进行精密动平衡；采用了消振和防振措施；加强恒温控制等。这种机床可用于各种非球曲面的镜面加工，可达到较高的形状精度和很小的表面粗糙度。

这机床可高精度地加工各种光学部件和激光光学系统的各种反射镜。其加工精度见表 4-3。



a）



b）

图 4-1　Union Carbide 公司的半球车床（1 号车床）
a）外观结构　b）空气轴承主轴
1—工件主轴　2—刀具头架主轴　3—刀具头架　4—多孔石墨轴衬　5—前止推板　6—进气孔
7—后止推板　8—挠性止推环　9—调整螺钉　10—外壳体

Moore 机床是一台很成功的超精密机床，美国 Moore 公司现在生产的 M-18AG 型超精密非球面车床，仍继续采用上述基本结构形式。空气静压轴承主轴、气浮导轴，分辨率为 0.01μm 的精密数控系统，双坐标双频激光测量系统作为工作台移动位置测量及反馈，机床床身用优制铸铁制造，有恒温油浇淋机床中的各发热部件，整台机床由三个空气隔振垫支承，以隔离外界振动的影响。M-18AG 型超精密机床现在已生产很多台，在美国和其他国家都在使用，是一台性能很好的超精密金刚石车床。

三、Ex-Cell-O 公司的 2m 镜面立式车床

在研究大输出功率的气体激光核聚变时，大多需要大直径的光学部件。Ex-Cell-O 公司开发了金属反射镜直径达 2m 的金刚石镜面切削车床。Ex-Cell-O 公司已拥有最高精度的滚动轴承的制造技术，但对于加工直径为 2m 的光学部件来说，滚动轴承的回转精度是不够的，加工的反射镜精度还达不到要求的数值，因而就开发了新的空气轴承回转轴，这在 1976 年超精密车床就完成了。制造的车床有用如双半球结构空气轴承主轴的 Ⅱ-G 型卧式车床和用如图 4-3

所示主轴结构的Ⅲ-B型立式车床。这种车床主轴的径向圆跳动为0.10～0.13μm，轴向跳动为0.15～0.18μm，每分钟2000转运转8小时的温升在5.6℃以内。径向刚度为361N/μm。Los Alamos科学实验室（LASL）使用这种车床切削8个波束CO_2激光Helicos上的金属反射镜。

四、美国Pneumo公司的MSG-325型超精密车床

美国Pneumo公司是一家著名的生产超精密机床的工厂，该厂生产的MSG-325型超精密车床已在很多单位使用。机床整体布局和Moore机床不同，采用T形布局，即主轴箱下有导轨，作z向运动，刀架溜板作x向运动，这样有利于提高精度。机床空气主轴的径向圆跳动和轴向跳动均≤0.05μm。床身溜板均用花岗岩制造，床身用重7t的2m×1.2m×0.6m的花岗岩，导轨为气浮导轨。机床用滚珠丝杠和分辨率为0.01μm的双坐标精密数控系统驱动，用HP5501A双频激光干涉仪精密检测位移，作为闭环数控系统的反馈。使用精密的圆弧刃金刚石刀具加工非球曲面的反射镜，可以达到很高的形状精度和很小的表面粗糙度。我国中科院长春光机研究所应用光学国家开放实验室购买了一台Pneumo公司的MSG-325超精密车床，使用效果良好。

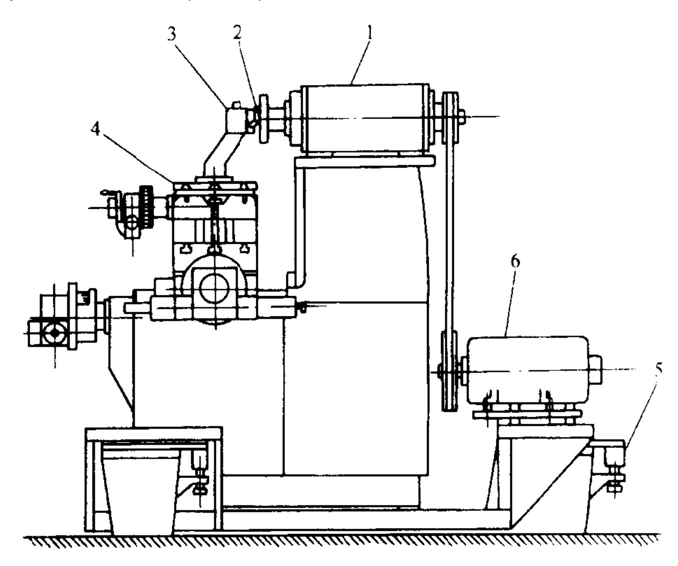


图4-2 Moore车床

1—空气轴承主轴 2—金刚石刀具 3—刀具夹持器 4—精密转台 5—空气垫（3点支承） 6—主电动机

表4-3 Moore车床加工的激光反射镜精度（1976年）

	平面镜	曲面镜
直径/mm	平面度/μm	形状精度/μm
<152.4 <635.0	0.3 1.2 2nm/mm	0.45 1.9 3nm/mm
表面粗糙度（nm，P—V）	7.5～20	20～62.5

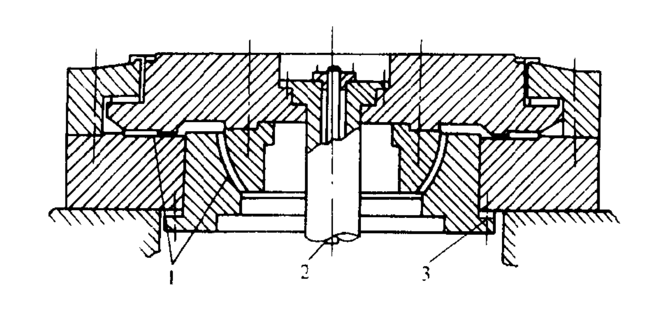


图4-3 垂直轴空气轴承工作台结构
（Ex-Cell-O公司的Ⅲ-B型立轴车床用）
1—多孔石墨轴衬 2—驱动轴 3—空隙

五、美LLL实验室DTM-3型大型超精密车床

在美国能源部支持下，LLL实验室和高水平的联合碳化物公司Y-12工厂联合开发，于1983年7月研制成功大型超精密金刚石车床DTM-3型（亦称3号机床）。用于加工激光核聚变用的各种金属反射镜、红外装置用零件、大型天体望远镜（包括X光天体望远镜）等。该机床可加工最大零件φ2100mm重量4500kg，图4-4所示为该机床的外观图。

上述超精密机床中最重要的问题是超精密运动位置的确定技术。采用了精密数控伺服方式，控制部分为内装式CNC装置和激光干涉测长仪，精确测量定位。为了实现刀具的微量进

给，在DC伺服机构内装有压电微位移机构，可实现纳米级微位移。该机床和该实验室1984年研制的另一台大型超精密车床LODTM一起是现在世界上公认技术水平最高、精度最高的大型金刚石超精密车床。

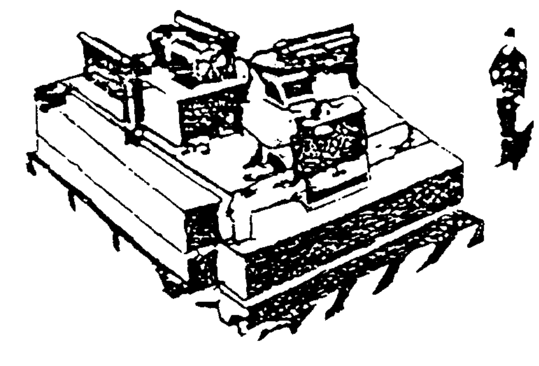


图4-4 美LLL实验室的3号大型超精密车床（DTM-3）外观图

该机床的主要特点：

（1）检测系统（Metrogy Loop）

1）长距离测定系统：在真空中用He-Ne激光干涉仪，分辨率2.5nm。

2）短距离测定系统：差动式电容测微仪。

3）除自重外不受任何载荷，具有独立的测量基准。

（2）运动系统的驱动与控制

1）x轴、z轴的驱动：由DC电机与静压轴承的ϕ50的驱动轮摩擦联驱动。

2）修正误差用刀具微位移机构：由PZT（PbZrO-PbT陶瓷）压电元件驱动（范围：2.5μm）并与电容测微仪组合后工作。

3）滑动导轨：x轴为V—平面液体润滑导轨，z轴为平面空气静压导轨。

4）主轴：油静压径向轴承、空气静压止推轴承、柔性连接驱动方式，交流变频电动机驱动、电动机为防止振动，直接安装在地基台面上。主轴刚度＞500N/μm。

5）电容传感器：分辨率0.625nm，直线性0.1%。

6）伺服系统：x、z传输轴为摩擦驱动，频带宽10Hz、最大送进量2.5mm/s。x、z轴的负荷补偿用波纹管的频带宽为0.01Hz。刀架的压电陶瓷微量进给驱动系统在100Hz以下工作时能达到预定的性能指标。

7）温度控制系统（在6m^{3}空间内）：流体温度控制可达（20±0.0006)℃，空气温度控制可达（20±0.005)℃。机床用1.5m^3/min恒温液体通过或淋浇。

（3）设计阶段的加工误差的预算为：

1）半径方向形状误差：27.9nm。

2）圆度、平面度（p-v值）：12.5nm.

3）加工表面粗糙度：R_a4.2nm（在最终切削深度为0.635μm时的值）。

4）机床底座为6.4m×4.6m×1.5m的花岗岩，（底座价5万美元），花岗岩热膨胀系数低，稳定性好，对振动的衰减能力比钢高15倍。

六、美国LLL实验室的大型光学金刚石车床LODTM

该车床由美国国防部高等研究计划局（DARPA）投资1300万美元，LLL实验室和空军Wright航空研究所等单位合作研制。从1980年3月开始以40个月的时间，于1983年7月初步制成加工光学零件的LODTM大型光学金刚石切削车床（Large Optical Diamond Turning Machine)，经试用检验，于1984年这台大型光学金刚石车床LODTM正式研制成功。这机床可以加工ϕ1625mm×500mm、重量1360kg的大型金属反射镜。为减少工件重量产生的变形影响，机床采用立式结构，如图4-5所示。

为提高这机床的精度，采取了一系列重要技术措施。机床采用立式结构，可以采用面积较大的止推轴承，提高机床的轴向刚度，并保证主轴有较高的回转精度。为提高机床运动位置测量系统的

测量精度，采用 7 路的高分辨力双频激光测量系统。使用 He-Ne 双频激光测量器，分辨力为 0.625nm。使用 4 路激光检测横梁上溜板的运动，使用 3 路激光检测刀架上下运动位置，通过计算机运算可以精确知道刀尖的位置。机床使用在线测量和误差补偿以提高加工精度。为减少热变形的影响，机床各发热部件用大量恒温水冷却，水温控制极为严格，在 (20±0.0005)℃。为减少受振动的影响，机床用大的地基，地基周围有防振沟，整台机床用 4 个大空气弹簧支承起来，其中有两个空气弹簧气室是连通的，这样 4 个空气弹簧实际是起三点定位的作用。为避免机床受水泵振动的影响，恒温冷却水是用水泵打入储水罐，恒温水是靠重力流到机床需要冷却的部分。这台大型超精密车床精度甚高，经美国国家标准局（NBS）进行精度检测，实测的结果如下：

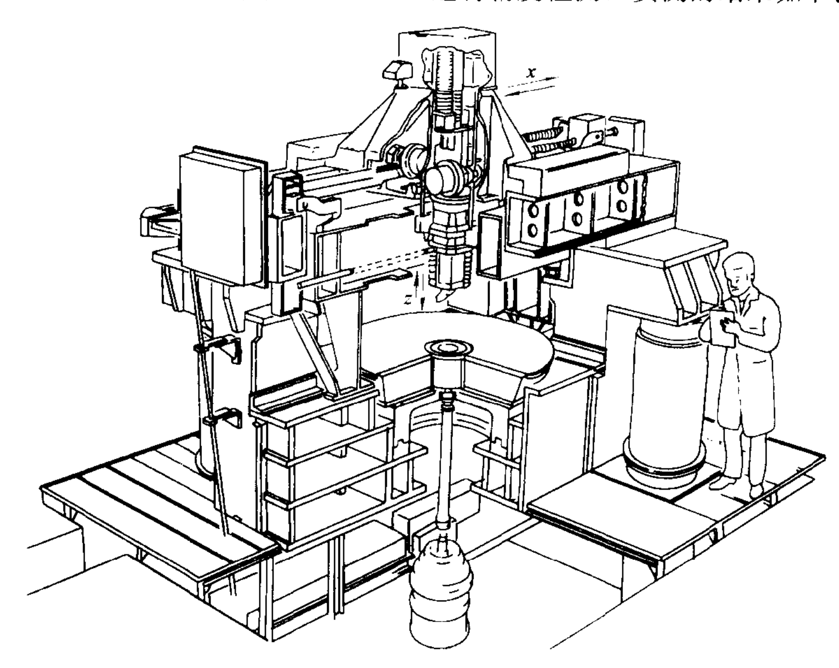


图 4-5　美国 LLL 实验室的大型光学金刚石车床（LODTM）

1）主轴：

静态	x 向（径向）	0.025μm
	z 向（轴向）	0.051μm

50r/min 时的主轴回转误差（P-V 值）

x 向（径向）	$<0.051\mu m$
z 向（轴向）	$<0.051\mu m$

2）直线定位误差（P-V 值）

x 向（径向）	$<0.051\mu m$
z 向（轴向）	$<0.051\mu m$

3）导轴运动直线度误差（P-V 值）

x 向（径向）	$<0.102\mu m$
z 向（轴向）	$<0.102\mu m$

4）激光测量系统综合误差

x 向（径向）	$<0.0025\mu m$
z 向（轴向）	$<0.0025\mu m$

七、英国 Cranfield 公司的 OAGM 2500 大型超精密机床

英国 Cranfield Precision Engineering 公司（CUPE）是英国著名的精加工工厂，1991 年 Cranfield 公司和 Brieish Science and Engineering Research Council（SERC）合作研制成功 OAGM 2500 大型超精密机床，用于精密磨削和坐标测量 X 射线天体望远镜的大型曲面反射镜，图 4-6 为该机床的外观图。这机床最大加工尺寸 2500mm × 2500mm × 610mm，有 ϕ2500mm 的高精度回转工作台。加工更大的曲面反射镜时，用三轴联动数控可以加工偏置轴（即不对称）曲面的反射镜块，再组合成大型的曲面反射镜。机床的 x 和 y 向导轨采用液体静压，z 向的磨轴头和测量头采用空气轴承。床身采用型钢焊接结构。中间用人造花岗岩填充，这样可保证高刚度，尺寸的高度稳定和很强的振动衰减能力。机床用精密数控驱动，用分辨力为 2.5nm 的 ZYGO AXIOM 双频激光测量系统检测运动位置，并向数控系统反馈控制。这台机床的精度大大高于过去同类的机床。

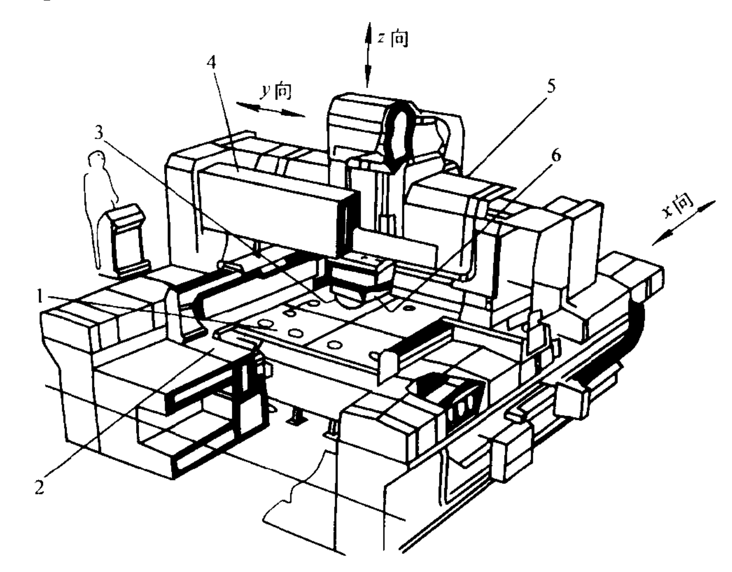


图 4-6 英 Cranfield 公司的 OAGM 2500 大型超精密机床
1—工作台 2—测量基准架 3—测头 4—y 向参考光束
5—溜板龙门架 6—砂轮轴

八、日本 TOYOTA 公司的 AHNIO 型高效专用车削、磨削超精密机床

日本开发多种高效专用超精密机床，这里介绍 TOYOTA 公司生产的一台专用超精密车床作为代表。这机床用于加工塑料高精度透镜的金属模。

这台超精密机床用于加工非球曲面，因模具用钢制造，需要磨削，故这机床可用于车削、铣削、磨削并带有精密测量装置。为实现这目标，这机床有一个 x 和 y 向调整的刀架及作 B 轴转动的高精度转台，借助三轴精密数控，可以加工平面、球面和非球曲面。

机床主轴用空气轴承，加工直径 100mm，刀架设计成滑板结构。移动距离：x 向为 250mm，z 向 200mm。直线移动分辨力 0.01μm，激光测量反馈，定位精度全行程 0.03μm。B 轴回转分辨力为 1.3″。砂轮轴的转速 100.000r/min，由气动透平驱动。刀具的切削刃（或砂轮廓形）通过显微镜放大显示在屏幕上，易于定位，提高加工精度。有些塑料透镜模具的非球曲面的曲率半径仅几毫米，用指状砂轮磨削时，砂轮轴相对于工件转成±45°，如图 4-7 所示。

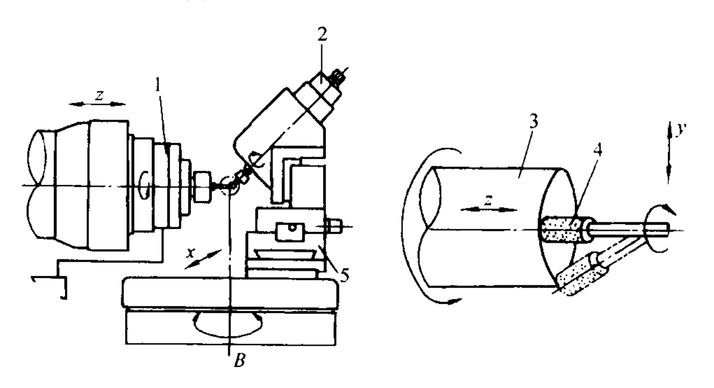


图 4-7 日本 AHN 10 型机床磨模具情况
1—主轴 2—磨头主轴 3—工件 4—砂轮 5—刀架

在测量时，夹着工件（金属模）的主轴转 90°成垂直向上状态。模具测量仪的测针下降到

工件，左右移动进行测量，尺寸数据经过计算在屏幕上显示出来。这机床加工模具形状精度为 0.05μm，表面粗糙度 R_a0.025μm。

第三节　精密主轴部件

超精密机床的质量，取决于关键部件的质量。世界各国都非常重视这问题，投入大量人力物力，对超精密机床的关键部件和关键技术进行开发研究。

精密主轴部件是超精密机床保证加工精度的核心。主轴要求达到极高的回转精度，转动平稳，无振动，其关键在于所用的精密轴承。早期的精密主轴采用超精密级的滚动轴承，例如瑞士 Schaublin，美国的 Hardinge 等精密机床，主轴用特制的超精密轴承，整台机床制造精度很高，因此机床加工精度可达 1μm，加工表面粗糙度达 R_a0.04～0.02μm。制造如此高精度的滚动轴承主轴，是极为不易的，希望更进一步提高主轴精度更是困难，很难办到。

在液体静压轴承和空气静压轴承使用后，滚动轴承已很少在超精密机床主轴中使用。

一、液体静压轴承主轴

液体静压轴承回转精度很高（0.1μm），转动平稳、无振动，因此部分超精密机床主轴使用这种轴承。我国沈阳机床一厂，济南机床一厂和上海仪表机床厂生产的超精密车床，主轴都使用这种液体静压轴承。

图 4-8 所示为典型的液体静压轴承主轴结构原理图。液体静压轴承常用的油压为 6～10 大气压。压力油通过节流孔进入轴承偶合面间的油腔，使轴在轴套内悬浮，不产生固体摩擦。当轴受力偏歪时，偶合面间泄油的间隙改变，造成相对油腔中油压不等，这油的压力差将推动轴回向原来的中心位置。液体静压轴承可达到较高的刚度。液体静压止推轴承，一般由两个相对的止推面做在轴的同一端，如图 4-8 所示。这是因为液体静压轴承工作转动时常产生较大的温升，如两个相对的止推面分别做在轴的两端，当温度升高时轴的长度增加，造成止推轴承间隙的明显变化，使轴承的刚度和承载能力显著下降。

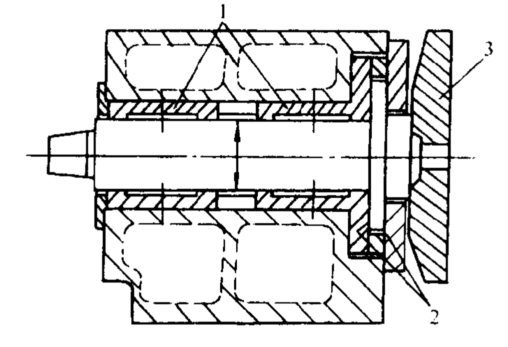


图 4-8　典型液体静压轴承主轴结构原理图
1—径向轴承　2—止推轴承　3—真空吸盘

液体静压轴承有较高的刚度和回转精度，但有下列缺点不易解决：

1）液体静压轴承的油温升高。在不同转速时温度升高值不等，因此要控制恒温较难。温度升高将造成热变形，影响主轴精度。

2）静压油回油时将空气带入油源，形成微小气泡悬浮在油中，不易排出，因此将降低液体静压轴承的刚度和动特性。

由于以上原因在 60 年代开始采用空气轴承主轴，由于它回转精度高、平稳、温升小，因而在超精密机床中得到广泛的应用。但是空气静压轴承刚度较低，承载能力不高，因而在大型超精密机床中有时仍采用液体静压轴承。例如美国 LLL 实验室的 DTM-3 型的大型超精密机床，其主轴的径向轴承采用液体静压轴承（止推轴承用气体静压轴承）。为解决前面提到的两个难题，该机床采用如下措施：

1）提高静压油的压力到 6～8MPa，使油中微小气泡的影响减小，提高了静压轴承的刚度

和动特性。

2）静压轴承用油经温度控制，基本达到恒温，减少轴承的温升。

3）轴承用恒温水冷却，减小轴承的温升。

采用上述措施后，该液体静压轴承主轴得到令人满意的性能。

二、空气静压轴承主轴

空气静压轴承有很高的回转精度，在高速转动时温升甚小，因此造成的热变形误差很小，空气轴承的应用促进了超精密机床的发展。空气轴承的主要问题是刚度低，只能承受较小的载荷。超精密切削时切削力甚小，空气轴承能满足要求，故在超精密机床中得到广泛的应用。

空气静压轴承的工作原理和液体静压轴承类似，轴由压力空气浮在轴套内，轴的中心位置由相对面的静压空气压力差维持。由于空气的流动性很好，因此轴承两偶合面间（轴与套之间）的空气泄气间隙甚小（常用间隙单边 6～15μm）。轴套中的空气腔面积甚小，或在空气输入的节流孔端作一倒棱，或沿轴向作一窄槽，两端均留较长的无槽泄气面。由于这种轴承的轴与套之间的间隙甚小，回转精度要求又高，故轴与轴套均要求极高的制造精度。如同一轴上有两个径向轴承，两轴承要求极高的同心度；同一轴上的径向轴承和止推轴承之间垂直度亦要求甚高，否则空气轴承主轴的回转精度就受到影响。空气轴承主轴结构较多，下面介绍几种典型的结构。

1. 圆柱径向轴承和端面止推空气静压轴承

这种结构和图 4-9 所示的液体静压轴承主轴结构基本相同，只是节流孔和气腔大小形状不同。这种空气轴承主轴结构比较简单，但要求前后径向轴承有很高的同心度，径向轴承和止推轴承有很高的垂直度，因此要求很高的制造工艺水平。日立精机的超精密车床使用这种结构的空气轴承主轴，获得较好效果。这种结构的空气轴承可以有较高的轴向刚度。

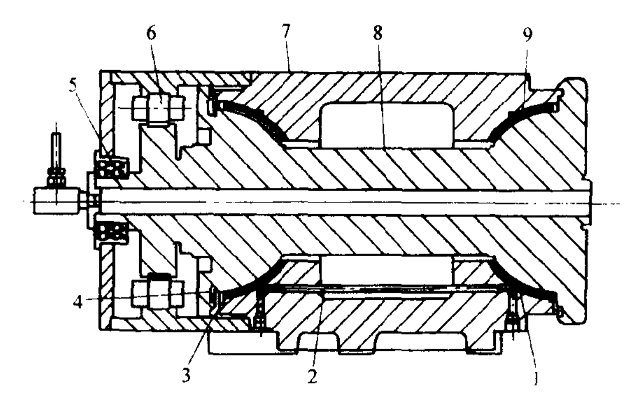


图 4-9　内装式双半球空气轴承同轴电动机驱动主轴箱（CUPE）
1—前轴承　2—供气孔　3—后轴承　4—定位环　5—旋转变压器　6—无刷电动机　7—外壳　8—轴　9—多孔石墨

图 4-1b 中是另一种结构的圆柱径向和端面止推空气轴承的主轴结构。这结构中径向轴承的轴套制成外面鼓形，能自动调整定心。先通气使轴套自动将位置调好后再固定，这样可提高前后轴套的同心度，以提高主轴的回转精度。这种结构的空气轴承，采用多孔石墨的轴衬来代替输入空气的小孔节流，使用效果良好。使用多孔石墨作空气节流的衬套还有很大好处，即在没有空气状态下轴如少量旋转，不会和轴套咬住使主轴损坏。现在国外很多空气轴承都使用多孔石墨来作空气节流。但用这种方法要求所用的多孔石墨组织均匀、各处透气率相同，这多孔石墨制造技术是难度很大的。

2. 双半球空气轴承主轴

这种结构见图 4-9。前后轴承均采用半球状，又是径向轴承又是止推轴承。由于轴承的气浮面是球面，有自动调心作用，因此可以提高前后轴承的同心度，提高主轴的回转精度。

现在美国有些工厂的超精密机床采用这种双半球空气轴承主轴，半径为153mm的主轴，刚度为115N/μm。英国Cranfield Precision Engineering公司生产的某些超精密车床使用这种双半球结构的空气轴承主轴，当轴承尺寸较大时，可以有较高的刚度和较大的承载能力，例如Cranfield公司的这种结构的PG150S型空气轴承主轴部件（图4-9），承载能力（径向和轴向）为180kg，径向和轴向刚度为350N/μm。

3. 前部用球形后部用圆柱径向空气轴承的主轴

这种结构的主轴现在在超精密机床中常使用。这种结构因一端为球形，同时起到径向和轴向止推轴承的作用，并有自动调心的作用，可以提高前轴承和后轴承（圆柱径向轴承）的同心度，从而提高了主轴回转精度。图4-10是日本东芝机械的超精密车床的这种结构的主轴。这种空气轴承主轴的主要性能见表4-4。从表中的数值可看到这种球形轴承主轴的刚度和承载能力均不高，优化轴承参数可以提高其刚度和承载能力。在有更高要求时，可加大轴承的尺寸。

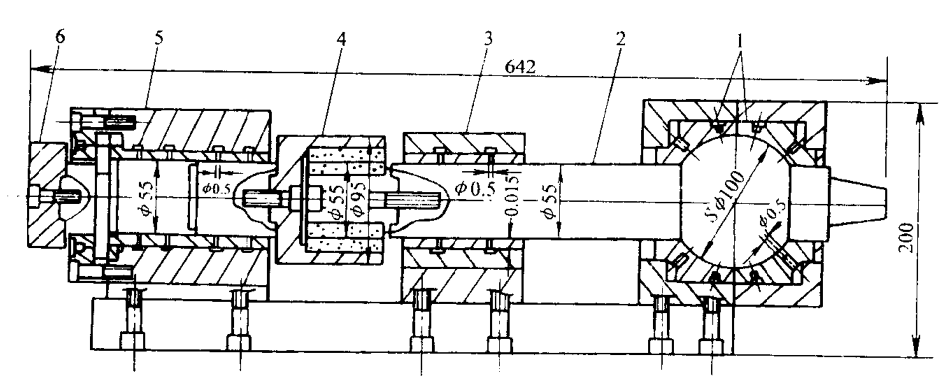


图4-10　一端为球形轴承一端为圆柱径向轴承的空气轴承主轴（东芝机械）

1—球轴承　2—主轴　3—径向轴承　4—电磁联轴器　5—径向及止推轴承　6—带轮

为进一步提高前后轴承的同心度，一端用球形轴承的空气轴承主轴，另一端径向轴承有采用图4-1b的结构。圆柱径向轴承的轴套外面，又加了半球状的空气轴承，使径向轴承的轴套能有一定程度的浮动，提高前后轴承的同心度，从而提高主轴的回转精度。

表4-4　一端用球形轴承的空气轴承主轴的性能（东芝机械）

规　格	ABS-6		ABS-10		ABS-12	
球的直径/mm	60		100		120	
回转精度/μm	径向 0.05	轴向 0.05	径向 0.05	轴向 0.05	径向 0.05	轴向 0.05
刚度/(N·μm⁻¹) （气压为0.6MPa）	15	29	49	59	69	80
允许负载/N （气压为0.6MPa）	88	176	294	393	441	539
最高转速/(r·min⁻¹)	10000		6000		5000	

4. 立式空气轴承

对于大型超精密车床，空气轴承主轴常采用立式结构，如图4-3所示。从图中可看到其径向轴承制成圆弧面，可起到自动调心、提高精度的作用。

三、超精密机床主轴和轴承的材料

超精密机床现在多数采用空气轴承主轴。使用空气轴承时，主轴和轴承的材料选取，对主轴的精度和性能有重要影响。机床主轴和轴承的材料选取应考虑下列因素：

1. 不易磨损

空气轴承主轴工作时，轴和轴套不接触不会产生磨损。但不通气时偶然会发生少量转动，要求主轴和轴套不咬住或磨损。如用多孔石墨作空气轴承套时，轴不易磨损。

2．不易生锈腐蚀

空气轴承工作时无润滑剂，虽通入的压缩空气经过去水，是干燥的，不致使轴承生锈腐蚀。但如轴承一段时间不工作，潮湿空气会进入轴承内，因此要求主轴和轴套材料不易生锈腐蚀。

3．热膨胀系数要小

空气轴承工作时虽发热量不大，温升也不大，仅1～3℃，但对超精密机床这温升仍将产生热变形，影响主轴回转精度。要减小温升除可采用恒温油浇淋降温外，应采用热膨胀系数小的材料制造主轴和轴套，并且主轴和轴套两种的材料的热膨胀系数应接近，免得空气轴承内的间隙变化。

4．材料的稳定性要好

因空气轴承精度甚高，要避免制成后变形，常需进行稳定化处理。

现在实际制造空气主轴和轴套材料的有：1）轴和轴套都用38CrMoAl氮化钢，经表面氮化和低温稳定处理；2）不锈钢制造；3）多孔石墨和轴承钢。此外文献中还报导在研究试验中，用下列材料作空气主轴：1）铟钢制造轴和轴套；2）花岗岩制造轴和轴套；3）线膨胀系数接近于零的微晶玻璃制造轴和轴套、4）陶瓷制造轴和轴套。

四、主轴的驱动方式

主轴驱动方式直接影响超精密机床的主轴回转精度，因此这是一个必需给予充分重视的问题。现在超精密机床主轴的驱动主要有下面三种方式：

1．电动机通过带传动驱动

早期的超精密机床都采用这种驱动方式，如图4-1、图4-2中的超精密机床都是电动机通过带传动驱动主轴旋转。现在仍有部分超精密机床采用这种驱动方式。

采用这种驱动方式，电动机采用直流电动机或交流变频电动机，这种电动机可以无级调速，不用齿轮调速以减少振动。电动机要求经过精密动平衡并用单独地基以免振动影响超精密机床。传动带用柔软的无接缝的丝质材料制成。带轮有自己的轴承支撑，经过精密动平衡，通过柔性联轴器（常用电磁联轴器）和机床主轴相连。采用上述措施主要是使主轴尽可能和振动隔离。图4-10所示的主轴结构即为用带轮（有自己的轴承支撑）通过柔性的电磁联轴器驱动机床主轴。

现在的超精密机床多数采用T形总体布局，即主轴箱作z向运动，刀架溜板作x向运动。这时主轴箱成为运动部件，采用电动机通过传动带驱动主轴的方式，就十分不便，电动机也不可能有单独的地基。因此现在多数的超精密机床采用电动机和机床主轴直接相连的驱动方案。

2．电动机通过柔性联轴器驱动机床主轴

采用这种驱动方案时，电机和机床主轴在同一轴线上，通过电磁联轴器或其他柔性连轴器和超精密机床的主轴相联，这时机床的主轴部件要比通过传动带驱动紧凑得多，这种驱动方式现在在超精密机床中用得较多。

采用这种主轴驱动方式时，电机采用直流电动机或交流变频电动机，可以很方便的实现无级调速。电动机应经过精密动平衡，电动机安装时尽量使电动机轴和机床主轴同心，再用

柔性联轴器消除电动机轴和机床轴不同心引起的振动和回转误差。这样可以尽量提高超精密机床主轴的回转精度。

采用这种主轴驱动方式时，主轴部件的轴向长度较长，使整个机床的尺寸加大。

3. 采用内装式同轴电动机驱动机床主轴

电动机是专制的内装式的，电动机轴即为机床主轴。电动机的转子直接装在机床主轴上，电动机的定子装在主轴箱内，电动机自己没有轴承，而是依靠机床的高精度空气轴承支承转子的转动。电动机现在都采用无刷直流电动机，可以很方便地进行主轴转速的无级变速，同时电动机没有电刷，不仅可以消除电刷引起的摩擦振动，而且免除了电刷磨损对电机运转的影响。为使主轴能获得尽量高的回转精度，电动机转子装在主轴上后应要求转子和主轴高度同心，并且转子应经过精密动平衡。电动机定子亦要求和主轴高度同心，电动机装配后转子和定子间的间隙均匀，使电动机驱动时的径向力尽量小，因电动机径向力将直接影响主轴的回转精度。现在一般的直流电动机都是方波驱动，这时的驱动转矩变化大致在10%～8%。这将使主轴的瞬时转速有波动，主轴转速低时，转速波动更明显。在要求主轴转动更平稳时，直流电动机可以采用正弦波驱动，这时驱动转矩波动可以控制在5%以内，但这时直流电动机的控制电路要复杂不少。

内装式同轴电动机驱动机床主轴存在的一个问题是：电动机工作时定子将发热产生温升，使主轴部件产生热变形。为减小热变形，电动机定子应采取强制通气冷却或定子外壳做成夹层，通恒温油（或水）冷却。采取以上措施后，可以基本解决内装式电动机发热问题。

主轴电动机做成内装式，电动机和机床主轴同轴，不仅可提高主轴的回转精度，而且主轴箱的轴向长度缩短，主轴箱成为一个独立的、很方便移动的部件。

主轴箱部件多数将作 z 向运动，刀架溜板作 x 向运动，z 向和 x 向导轴都做在机床床身上，使机床结构布局大为简化，容易提高导轨的运动精度。在这方案中要求有上述的可移动的主轴部件。图 4-9 所示为英国 Cranfield 公司（CUPE）用于所生产的超精密机床的主轴部件，是采用内装式同轴直流电动机驱动机床主轴的。现在新研制的超精密机床，很多都采用内装式同轴无刷电动机驱动或内装式同轴交流变频电动机驱动。因此可以认为这是超精密机床主轴驱动方式的发展方向。

超精密机床的主轴电动机一般要求在某速度以下为恒转矩，某速度以上为恒功率，这样在低速时可满足必要的切削转矩。

第四节　床身和精密导轨部件

一、超精密机床的总体布局

超精密机床的总体布局对其性能好坏起决定性影响。现在超精密机床绝大多数用于加工反射镜等盘形零件，因此一般都没有后顶尖。

对超精密车床，刀具相对于工件，需作纵向（z）和横向（x）运动，因此需要有 z 方向和 x 方向的导轨。某些机床，如 Moore 车床，还增加一个回转工作台，使上面装的金刚石刀具在加工非球曲面时，始终垂直于加工表面，以减小圆弧刃刀具误差对工件形状的影响。这时除有 z 和 x 方向的导轨外，还增加一个垂直的 B 转轴。根据这种运动要求，现在超精密机床的总体布局有下面几种。

1．主轴箱位置固定，刀架装在十字形滑板上

一般的机床和精密机床，z 和 x 方向的导轨都集中在工作台（或溜板）上，形成十字形滑板。图 4-11 所示为 Moore 坐标镗床和三坐标测量机所用的十字形滑板构成的 z、x 双向工作台。这种结构布局在 Moore 公司现在生产的 M-18AG 超精密非球曲面车床也采用（见图 4-2）。

上述结构布局要求十字形滑板的上下导轨，不仅要有很高的直线运动精度，而且要有非常严格的相互垂直精度。这要求有很高的制造精度，才能满足超精密机床的精度要求，否则下滑板的运动误差将影响上滑板的运动精度。

最近生产的超精密机床，都采用双频激光干涉仪作 z、x 方向运动的随机位置检测。这对采用十字形滑座结构很不方便，因为：第一，必须有一路双频激光干涉仪装在移动的十字形滑座上，这将降低测量精度；第二，双频激光干涉测量系统有一定体积，使整个工作台系统高度大大增加。图 4-2 中 Moore 车床结构外形图中可以看到。

采用这种结构布局时，主轴箱位置固定不动，因此主轴用传动带驱动很方便，电动机可以有单独地基，可以减少电动机振动对主轴的影响。

2．T 形布局

近年生产的超精密机床主轴，常采用电动机通过柔性联轴器和主轴相联，或采用内装式同轴电动机驱动，没有带轮和单独的电动机座，主轴箱成为可移动的整体部件。这种超精密机床常采用 z、x 运动分离的结构，即纵向运动（z 向）由主轴箱完成；横向运动（x 向）由刀架完成。z 向和 x 向运动的导轨都做在机床的床身上（常用花岗岩制造），成 T 形布局，这两导轨可以基本在同一高度上。这种总体布局结构，有利于提高导轨的制造精度和运动精度。除此以外检测 z、x 向运动位置的双频激光测量系统可以装在固定不动的床身上，仅测量位置用的反射镜装在 z、x 方向的移动部件上。这不仅使测量系统的安装要简单很多，而且可大大提高测量精度。Pneumo 公司的 MSG-325 超精密车床，即采用这种导轨布局。T 形布局优点较多，现在中小型超精密机床常用这种总体布局。

还有另一种 T 形机床总体布局，即主轴箱作 x 向运动，刀架溜板作 z 向运动。x 向运动和 z 向运动的导轨都做在机床的床身上，如图 4-12 所示。这种总体布局的优缺点和前一种 T 形总体布局差不多，但是实际生产中应用不如第一种 T 形总体布局多。

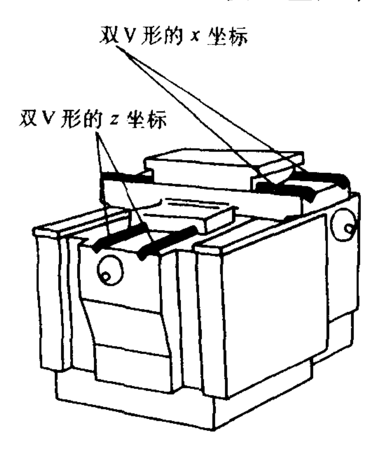


图 4-11　十字形滑板构成的 x、z 双向工作台（Moore 3 号坐标测量机）

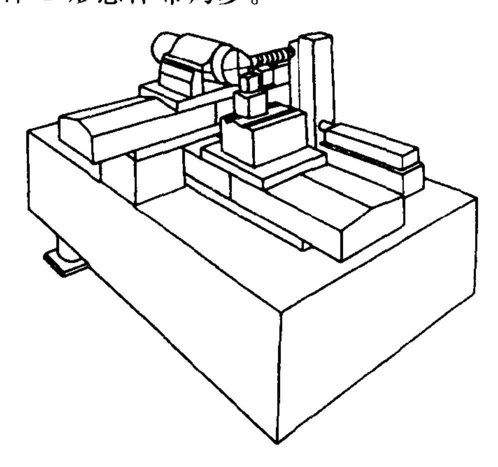


图 4-12　第二种 T 形总体布局

3. R-θ 布局

刀架溜板装在回转工作台上，改变刀座导轨的转角 θ 和半径 R，可加工非球曲面。在工件的厚度改变时，主轴箱（或回转工作台）需要在 z 向调整，机床结构比较复杂。加工调整计算和习惯用的不一致，因此用得不多。

4. 立式结构布局

当工件直径较大并且重量较重时，超精密机床多采用立式结构布局，结构布局常用的如图 4-5 中所示。超精密机床要求高的刚度，故多用龙门形式，滑板在横梁上作 x 向运动，刀架在滑板上作 z 向上下运动。这种十字滑板结构 x 向的运动精度将直接影响 z 向运动的精度。在机床精度要求特别高时，如美国的 LODTM 大型超精密立式机床，它采取了特殊的在线测量和误差补偿措施，来补偿消除运动误差。

二、床身和导轨的材料

超精密机床床身结构因所用材料不同而异。过去床身和导轨材料都用铸铁，现在多数采用花岗岩等新材料，现简述如下：

1. 优质耐磨铸铁

铸铁是传统的制造床身和导轨的材料，它的优点是工艺性好，应选用耐磨性好，热膨胀系数低，对振动衰减能力强，并经时效消除内应力的优质合金铸铁作精密机床的床身和导轨，可以得到满意的结果。近年来多数精密坐标测量机和超精密机床改用花岗岩，但美国 Moore 公司和瑞士 SIP 公司仍使用铸铁床身导轨，他们认为花岗岩有吸湿性，会导致微量变形，降低机床的精度，反不如铸铁好。

2. 花岗岩

花岗岩现在已是制造三坐标标测量机和超精密机床的床身和导轨的热门材料，这是因为花岗岩比铸铁长期尺寸稳定性好，热膨胀系数低，对振动的衰减能力强，硬度高、耐磨并不会生锈等。花岗岩和铸铁等材料的性能对比见表 4-5。从表中的数值可看到，根据花岗岩的性能，用它做超精密机床的床身和导轨是比较好的。

表 4-5 几种机床结构材料的性能对比

性　　能	Al_2O_3 陶瓷	铸铁	钢	铟钢	花岗岩	人造花岗岩
杨氏弹性模数 E/(GPa)	240	100	210	140	40	33
密度 ρ/[g·(cm^3)$^{-1}$]	3.4	7.3	7.3	8.2	2.6	2.5
刚度比	7	1.4	2.7	1.7	1.5	1.3
振动的对数减缩率 A,($\times 10^{-3}$)	0.6	1～3	0.5	—	6	20
线膨胀系数 α_l/[($\times 10^{-6}$)·K^{-1}]	7	12	11	0.6	8.3	12
热导率 λ/[W·(m·K)$^{-1}$]	16	53.5	44	10.5	3.8	0.47

用花岗岩做床身时，一般都用整体方块，钻孔埋入螺母以便和其他件连接。导轨也常用花岗岩做。花岗岩加工比较困难。空气静压导轨的节流孔在花岗岩中加工比较困难，故有时导轨做成花岗岩和钢的组合结构，以便于加工。

花岗岩的主要缺点是它的吸湿性，吸湿后产生微量变形，影响精度。有人提出在花岗岩表面涂上某种涂料以减低其吸湿性。

3. 人造花岗岩

花岗岩不能铸造成形且有吸湿性。为解决这问题国外提出了人造花岗岩。人造花岗岩是由花岗岩碎粒用树脂粘结而成。用不同粒度的花岗岩组合可提高人造花岗岩的体积比（可达 90%～95%），使人造花岗岩有优良的性能，不仅可铸造成形，吸湿性低，并对振动的衰减能力加强。瑞士 Studer 公司采用人造花岗岩 Granitan 制造高精度 S 系列磨床的床身，效果甚佳，成

为专利，已在不少工厂推广应用。

英国 Cranfield 公司的 OAGM 2500 大型超精密机床，床身采用焊接钢结构，中间用人造花岗岩填充，获得满意的结果。

三、导轨的结构形式

常用的机床的导轨结构形式有燕尾形的，有平面的，有 V-平面的。有双 V 形的。对精密机床，如无特殊强制润滑措施，燕尾形和平面导轨有磨损，需定期校准其侧向间隙。现在液体静压导轨和空气静压导轨多数采用平面导轨结构。

1. V-平面

导轨磨损后可自动补偿，保持间隙和润滑，不少机床采用这种结构。但这种结构有下述缺点：第一，V 形和平面导轨面的磨损不相等，因此工作台面因导轨面磨损而下降量不均匀；第二，当工作台重心和载重偏离中央并偏向平导轨面一侧时，V-平面导轨的导向能力就要明显下降，如图 4-13a 所示。

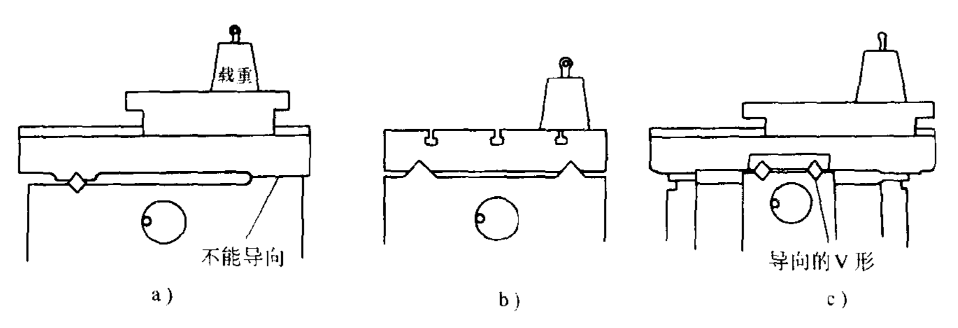


图 4-13 当工作台和载重偏离中央时，不同形式导轨的导向能力

a）导向差 b）导向好 c）导向好

V-平面导轨在超精密机床中还有使用的，如日本丰田工机的某型号超精密机床即使用这种导轨型式（见图 4-14）。但为减少导轴磨损采用强迫润滑。

2. 双 V 形导轨能为直线运动提供良好的导向性

两条导轨上的摩擦和磨损是均匀的，驱动元件可对称地处在两条 V 形导轨之间，如图 4-13b 所示。这些都可保证导轨的直线运动精度。双 V 形导轨在载重偏离中央时，仍能有较好的导向性。如果工作台面（或十字滑板）宽度较大，为防止一侧受重载变形，可在双 V 形导轨两侧加辅助平面支承，仍做成对称结构，驱动元件在中央，如图 4-13c 所示。

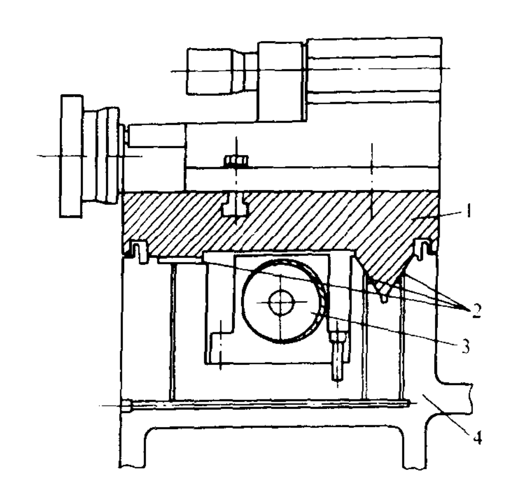


图 4-14 压力油强迫润滑的 V-平面导轨（丰田工机）

1—工作台 2—压力润滑 3—液压缸 4—底座

这种双 V 形导轨在载重偏离中央时，仍能保持良好导向。美国 Moore 公司生产的坐标镗床、坐标测量机等都采用双 V 形导轨，如图 4-11 所示。在采用淬硬镶钢导轨时，应注意淬硬钢导轨镶条必需装在长的下导轨面上，短的上导轨面是软的。这样，长的下导轨面基本不磨损，上导轨面则均匀磨损，使导轨能长期保持精度，而不会发生长导轨中某一段因经常使用而局部磨损下凹，

破坏导轨的精度。

3. 压力油润滑导轨

对超精密机床导轨部件要求有极高的直线运动精度，并且能长期保持它的精度，要求直线运动时绝对没有爬行现象。这一方面要求导轨有极高的制造精度，同时要求导轨的偶合面没有摩擦和磨损。因此超精密机床的导轨在不采用液体静压导轨或空气静压导轨时，导轨接触面必须用压力油强迫润滑。

图 4-14 所示是日本丰田工机的超精密机床的导轨，它采用 V-平面导轨结构，使用压力油强迫润滑导轨接触面。在工作台面有较大重量，润滑油压力很稳定时，导轨可得到较好的直线运动精度。但前面已经分析，这种导轨不是对称结构，当载重偏离中央时，导轨的导向性下降，润滑油压力波动将影响直线运动精度，故这种 V-平面导轨的精度提高是有限制的。

4. 导轨偶合面的接触形式

超精密机床导轨部件要求有极高的直线运动精度，不能有爬行，导轨偶合面不能有磨损。这一方面要求导轨有很高的制造精度，导轨的材料要有很高的稳定性和耐磨性，导轨的偶合面有很好的偶合形式。

精密和超精密机床导轴的偶合面，一般的摩擦接触已较少采用，现在采用的方式有：导轨表面用耐磨塑料层；导轨接触面强迫润滑；滚动导轨；液体静压导轨；气浮导轨；空气静压导轨。下面对滚动导轨、液体静压导轨、空气静压导轨作一简单介绍。

四、滚动导轨

滚动导轨在一般机床和精密机床中应用多年，近年来滚动导轨技术的提高使其应用面又得到扩大。过去滚动导轨用的都为滚柱直线滚动轴承，现在又增加了再循环滚柱滚动组件和再循环滚珠滚动组件。直线运动的精度比过去大为提高，可以达到 μm 级精度，摩擦系数极低，仅 0.002～0.003。

1. 直线滚动轴承

这是过去长期使用的，滚柱带保持架在导轨的偶合面间作直线滚动，轴承长度根据工作行程长度决定。使用高精度滚柱和一定的预载应力时，可以得到较高的直线运动精度。

2. 再循环滚柱滚动组件

直线滚动轴承的工作长度受到轴承长度的限制。再循环滚动组件由于滚柱的再循环，它的工作行程长度可以无限，没有任何限制。

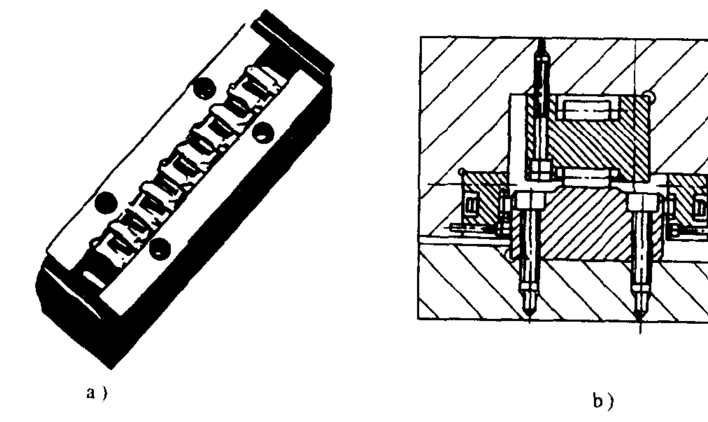


图 4-15 单列滚柱再循环滚动组件及其应用

图 4-15 中是单列滚柱的再循环滚动组件的外观图和这组件使用在矩形导轨时，再循环滚柱组件的安装情况。为保证导轨的两侧面导向准确，消除间隙，用调整螺钉侧面给再循环滚动组件加一定的预载应力，如图 4-15b 所示。

此外还另有一种双列滚柱的再循环滚动组件，这种滚动组件用于机床导轨可以得到良好的效果。

滚动再循环滚动组件有较大的承载能力，摩擦系数很小，能制成较高精度，适合在一般的精密机床和精密加工中心的导轨使用。

滚柱的制造精度很难达到极高，且同一滚动组件中的滚柱也很难达到直径完全相同，因此高精度的精密机床和超精密机床使用再循环滚柱滚动组件不易达到很高精度。

3. 再循环滚珠滚动组件。

再循环滚珠滚动组件和再循环滚柱滚动组件相比可以制成更高的精度。过去认为滚动滚珠组件的承载能力低，现在由于滚珠的滚道制成凹圆弧截形，使承载能力大为提高。根据日本THK公司报导可取滚道截面圆弧半径r和滚珠半径R之比为r=1.04R，接触区受载弹性变形后形成一定面积的椭圆接触区，大大提高允许载荷。以滚珠直径1/4in（ϕ6.35mm）时为例，在允许接触应力为4200N/m^{2}时，平滚道允许载荷仅为285N，而凹圆弧滚道的允许载荷高达3680N，允许载荷提高了12倍。

再循环滚珠滚动组件一般和下导轨一同供应，可用螺钉分别固定在滑板和机床床身上，需要时还可加上导轨的防护罩如图4-16所示。

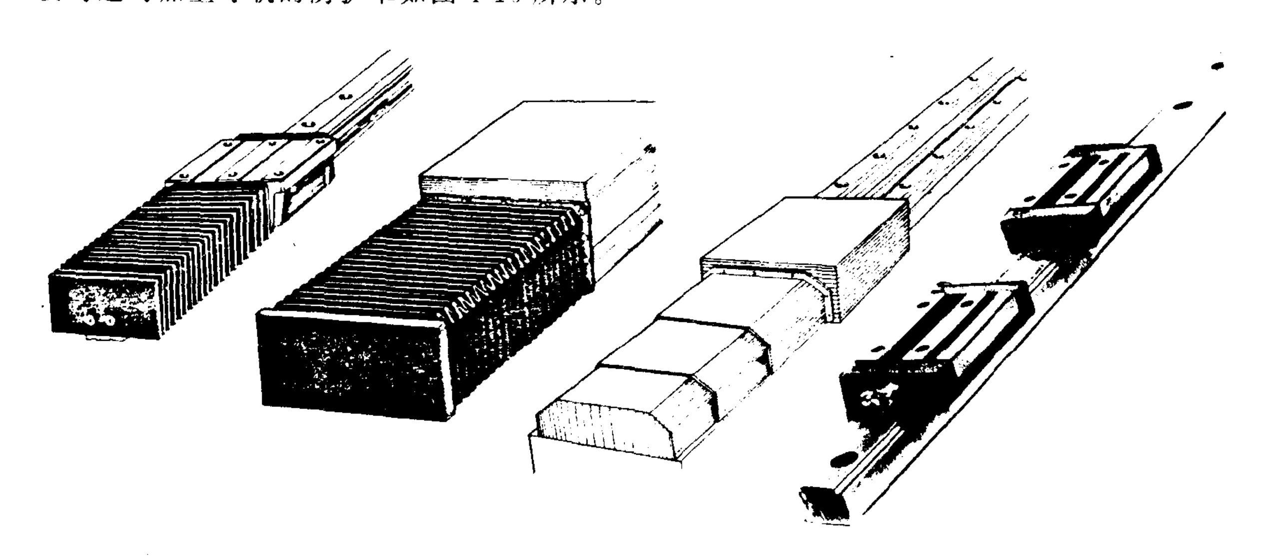


图4-16　再循环滚珠滚动组件

当精密级滚珠再循环滚动组件用于精密导轨时，预载力不宜很大，一般在3～4N，摩擦系数在0.002，直线运动精度可以达到1μm。

五、液体静压导轨

图4-17所示是不同结构的液体静压导轨。由于导轨运动速度不高，液体静压导轨的温度升高不严重，而液体静压导轨刚度高，能承受大的载重，直线运动精度高并且平稳，无爬行现象，所以现在有不少的超精密机床使液体静压导轨。图4-17a是平面型液体静压导轨，要求导轨的运动件上下、左右面都在静压油的作用下，可保证很高的导轨运动精度和很高的刚度。由于液体静压导轨还有一定的工作温升，两个侧向静压油腔（左右两个）集中放在左边的导轨的左右侧面，这样温度变化造成的油腔间隙变化较小。这种结构是左右不对称的，因此甚难做到极高精度。平面型液体静压导轨，如果优化结构是有可能制成左右对称结构，这时驱动元件（滚珠丝杠驱动或摩擦驱动）可以放在中心位置，有利于提高导轨的运动精度。

现在很多超精密机床和导轨部件是用花岗岩制造，花岗岩由于加工困难无法做成整体，两侧面块和两个下油腔块都需要用螺钉紧固在台面上，由于油压力的作用，很容易产生变形、导

致下油腔间隙加大。要减小变形需加大侧块的宽度，有时会造成结构设计的困难。因此有的液体静压导轨做成花岗岩和钢的组合体，油路和节油孔做在钢件内，这样不仅解决结构设计上的困难，并且加工制造也比较容易。这问题对后面讲的空气静压导轨亦同样存在。

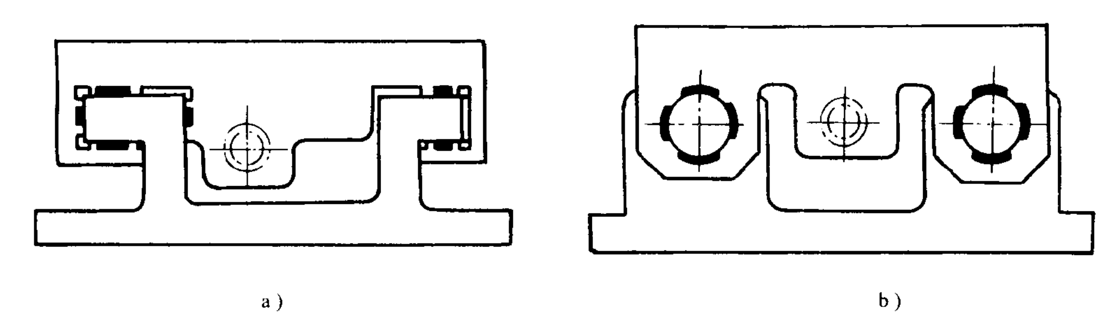


图 4-17　不同结构的液体静压导轨

图 4-17b 是双圆柱型液体静压导轨。圆柱静压导轨本身可制成甚高精度，但两个圆柱导轨要制造调整到严格平行是相当难的，因此这种结构的液体静压导轨用得不普遍。

液体静压导轨中平面型结构用得较多。

六、气浮导轨和空气静压导轨

气浮导轨和空气静压导轨在精心制造时可以得到很高的直线运动精度，运动平稳，无爬行，摩擦系数接近于零，不发热，因此在超精密机床中得到较广泛的应用。

1. 气浮导轨

当导轨上的运动部件重量很重并且压缩空气压力非常稳定时，可用气浮导轨。气浮导轨常用平导轨，运动导轨的底平面和两侧导轨面有压缩空气，使运动部件（滑板或工作台）浮起，如图 4-18 所示。从图中的情况可看出，工作台的浮起是气浮作用，但侧面是气体静压作用，属气体静压导轨。气浮导轨的刚度低于空气静压导轨，且受压缩空气压力波动的影响。在压缩空气压力高度稳定时，气浮导轨可以得到较高的直线运动精度，导轨无爬行现象，无摩擦。美国 Pneumo 公司的 MSG325 超精密车床即使用气浮导轨。

2. 空气静压导轨。

空气静压导轨的运动件的导轨面，上下、左右均在静压空气的约束下，因此和气浮导轨相比有较高的刚度和运动精度。图 4-19 是日立精工的超精密机床的空气静压导轨的结构示意图。这是比较典型的空气静压导轨的结构，工作台的导轨面的上下、左右均在静压作用下，移动导轨浮在中间，基本没有摩擦力。空气静压导轨不发热，没有温升，因此两个侧导轨面做在工作台的左右两端，没有因温升而造成的侧导轨面间隙的变化。空气静压导轨亦有不同形式，其中平面型导轨用得较多。

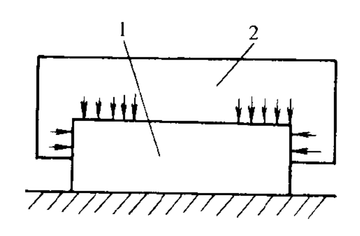


图 4-18　气浮导轨
1—床身　2—运动件

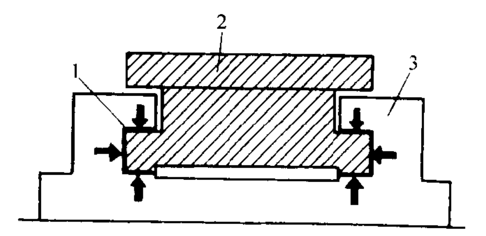


图 4-19　平面型空气静压导轨（日立精工）
1—静压空气　2—移动工作台，约 200kg
3—底座

空气静压导轨要得到良好的工作效果，静压空气的节流方式是一个重要因素。现在实际采用的节流方式有：多孔石墨节流、小孔节流、毛细管节流、狭缝节流、表面节流等。多孔石墨节流效果较好，国外用得较多。但多孔石墨要求透气性均匀、制造不易，在国内还很少采用。小孔节流工艺性好，实际使用效果较好，国内用得较多。毛细管节流和狭缝节流原理和小孔节流相同，但工艺性不如小孔节流好，用得不多。表面节流是在表面开极浅的等压槽，增大气体高压区的面积，一般用作小孔节流方式的补充。现在常用的静压空气压力为 1～6 大气压，气压再高容易产生振荡。

要使静压空气导轨刚度高，运动平稳，工作效果好，要求移动部件（工作台或滑板）有一定重量。采用小孔节流时，节流孔离排气边缘不可太近，节流孔间可用深 10～20μm，宽 1～2mm 的槽相连，以增加高压区的面积，节流孔直径位置、孔数和偶合面间间隙等应经优化计算，使导轨的刚度高，承载能力大，运动平稳。按空气静压轴承的原理，当运动部件在正中位置时，即上、下两静压气隙相等时，刚度最高。对空气静压导轨，移动部件（溜板或工作台）有相当重量，将偏离中间位置，使刚度下降。故设计空气静压导轨时，可将上下气浮面的面积设计成不等。使相差的空气浮力正好抵消工作台的重量，使移动部件正好处在中间位置，处在最大刚度的位置。

空气静压导轨的刚度和允许载荷的高低，主要是由空气静压导轨的设计、参数优化好坏决定。空气静压导轨的运动精度主要是由导轨的制造精度决定。现在精心制作的空气静压导轨可达到极高的运动精度，约为 0.1～0.05μm/100mm。

在某些情况下，导轨结构不允许上下，左右均有压缩空气作用，图 4-20 所示方案是解决办法之一。如图所示，工作台一方面由压缩空气作用从导轨面浮起，同时由真空造成对工作台吸力，保持一定的空气间隙。这种空气导轨的刚度要比静压空气导轨的低，但是在压缩空气压力稳定，真空度稳定时，这种空气导轨也可以很好工作，达到较高的运动精度。

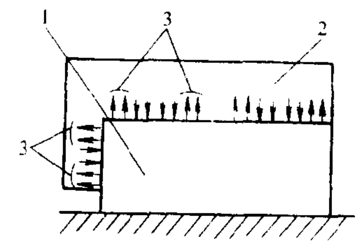


图 4-20　利用真空和气压作用的空气导轨

1—底座　2—运动工作台　3—真空

当机床的空气静压导轨（床身和工作台）采用花岗岩制造时，由于花岗岩加工困难，一般都不做成整体，而做成花岗岩块用螺钉紧固在一起。应注意侧气浮面块应有一定宽度，最好能容纳两排螺钉，以保证紧固的刚性，如图 4-21 所示，以免在压缩空气作用下，气浮压板块变形而使气隙增大。

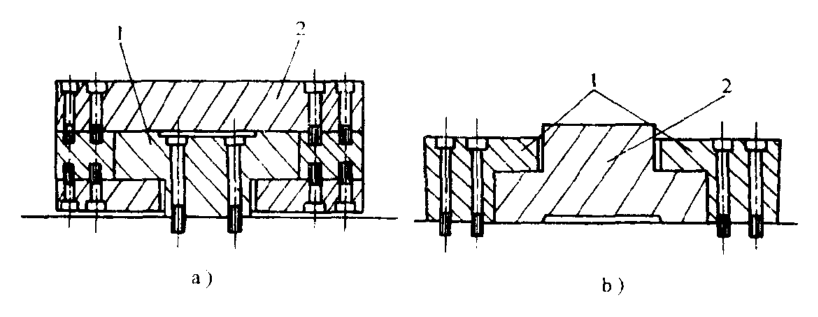


图 4-21　花岗岩空气静压导轨的结构

a）三块式　b）二块式

1—床身　2—运动件

表 4-6 为日本几个工厂的液体静压导轨和空气静压导轨的性能对比，可在选择导轨形式时作为参考。表中未给出液体静压导轨的刚度和允许载荷，这是因为液体静压的刚度和允许载荷都很高，不需要再特殊考虑。

表 4-6　日本的代表性的超精密静压导轨性能

导轨类型	液体静压导轨		空气静压导轨	
生产厂	丰田工机	不二越	日立精工	东芝机械
行程长度/mm	300	350	200	200
直线度/（μm・100mm⁻¹）	0.15	0.029	0.05（H） 0.015（V）	0.017（H） 0.050（V）
刚度/（N・μm⁻¹）	—	—	490	294
允许负荷量/N	—	—	2940	1960

注：H—水平方向；V—垂直方向。

第五节　进给驱动系统

一、精密数控系统

对超精密机床，刀具相对于工件需作纵向（z 向）和横向（x 向）运动。因此需要有 z 向和 x 向的精密数控系统驱动。超精密机床都需要用来加工非球曲面，因此需要双坐标联动的精密数控系统。某些机床，如 Moore 公司的 M—18AG 非球面超精密车床，还增加一个精密回转工作台，使上面的金刚石刀具在加工非球曲面时，始终垂直于加工表面，以减小圆弧刀刀具误差对工件形状的影响。这时除有 z 向和 x 向精密数控系统外，还增加一个围绕垂直轴旋转的 B 转轴数控系统，并要求三轴联动以加工出所要求的非球曲面。

为了要加工出形状精度很高的非球曲面，要求精密数控系统有很高的分辨力，达到数控系统每脉冲在 z 向或 x 向的移动量为 0.01μm。现在国外的几个著名的生产数控系统的公司都有分辨力很高的精密数控系统的产品，但在国内因受禁运的限制，很难买到。

精密数控系统现在使用直流伺服电机或交流伺服电机，在精密的双频激光测量系统检测 z 向和 x 向的位移反馈给精密数控系统，形成闭环控制系统，达到要求的位移精度。

最近研究成功步进电动机脉冲转角的细分，使步进电动机实现小角度转动，提高位移的分辨力，但步进电动机提高细分后的分辨率仍不易满足超精密机床精密位移分辨力的要求。

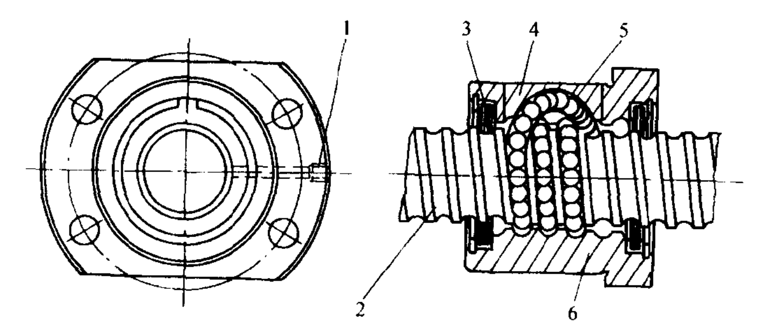


图 4-22　滚珠丝杠副的结构原理图

1—油孔　2—丝杠　3—密封圈　4—油罩　5—滚珠通道　6—螺母

二、滚珠丝杆副驱动

一般的数控系统都是伺服电动机通过滚珠丝杠副驱动机床的滑板或工作台。现在有相当多的超精密机床仍采用精密滚珠丝杠副作为进给系统的驱动元件。

图 4-22 是滚珠丝杠副的结构原理图。滚珠在丝杠和螺母的螺纹槽内滚动，因此摩擦力很

小。丝杠的螺纹槽经过精密磨削，可以达到很高精度。滚珠在螺母内有再循环通道，因此行程长度不受滚珠的限制。

滚珠丝杠副要求正转和反转没有回程间隙，否则数控系统控制进给将得不到要求的精度，这要求滚珠丝杠和配合的螺母有一定的预载过盈。由于丝杠的螺距有一定制造误差，故螺母在丝杠上不同位置过盈量将有变化。如预载应力太小则有可能在丝杠的某一位置出现有间隙；如预载应力太大，在丝杠的某位置可能转动不灵活。为能方便精确的调整预载应力，精密级和高精密级滚珠丝杠的螺母常做成两段组合，如图 4-23 所示，改变中间垫片厚度可以很方便的调整它的预载应力。现在高精密级的滚珠丝杠副可以做到相邻螺距误差 0.5～1μm，积累螺距误差 3～5μm/300mm。

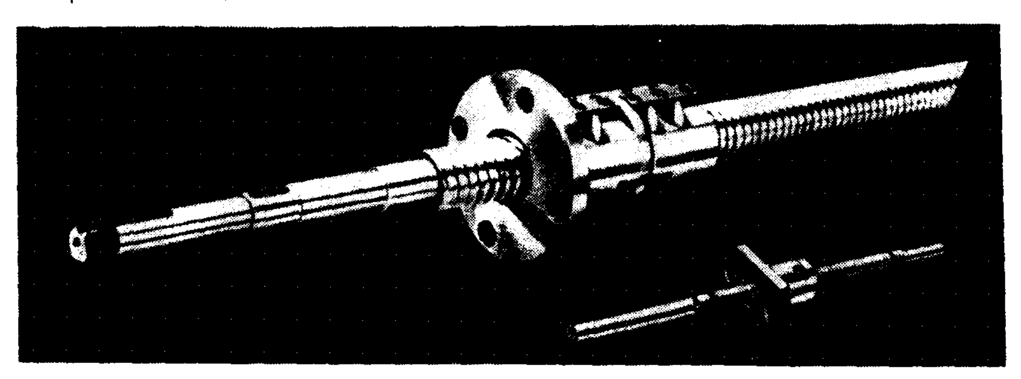


图 4-23　精密滚珠丝杠副

现在超精密机床中使用滚珠丝杠副驱动时，都有双频激光检测系统作为进给量的检测和反馈，故丝杠积累误差稍大，问题并不严重。使用滚珠丝杠副的最主要问题是由于丝杠螺距误差的影响，在进给全行程中，丝杠和螺母配合的松紧程度有变化，影响进给运动的平稳性。因此，虽然现在很多超精密机床仍使用滚珠丝杠副作进给的驱动元件，但已经开始研究使用摩擦驱动来取代滚珠丝杠副。

三、液体静压和空气静压丝杠副驱动

滚珠丝杠副虽然摩擦力不大，但由于丝杠螺母间的预载过盈，在全行程中有变化，影响进给平稳性，现在有使用液体静压丝杠和空气静压丝杠以提高进给运动的平稳性。

液体静压丝杠副和空气静压丝杠副的结构极为相似，只是前者为用油压，后者都用压缩空气，前者油的间隙大些，后者空气间隙稍小些。液体静压丝杠副的结构见图 4-24a，空气静压丝杠副的结构见图 4-24b。空气静压丝杠副的进给运动极为平稳，但因刚性略低，正反运动变换时将有微量的空行程。液体静压丝杠传动副可以得到很好的使用效果，但是它不像滚珠丝杠传动副已有标准产品可以选用，液体静压丝杠传动副必须专门制造，它的制造比较复杂，因而用得不很多。

四、滚珠丝杠传动副的联接

滚珠丝杠传动副中丝杠一般是和伺服电动机相联，螺母则和工作台（或溜板）相联，电动机转动时使丝杠转动，螺母带动工作台作前进或后退的直线运动（当然也可螺母固定，丝杠带动工作台运动）。超精密机床要求滚珠丝杠的径向振摆极小且丝杠的轴线和进给方向严格平行，否则将使工作台承受上下或左右的作用力，将影响导轨运动的直线性。

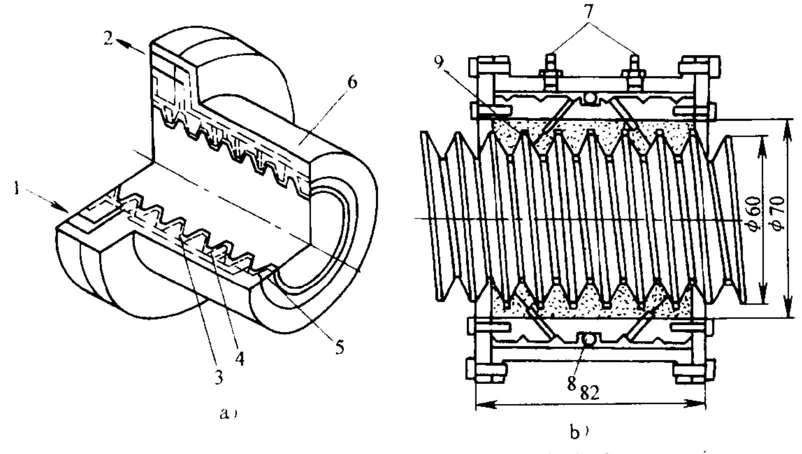


图 4-24 滚体和空气静压丝杠传动副

a) 液体静压 b) 空气静压

1—进油 2—排油 3—油腔 4—外螺纹 5—密封圈 6—螺母 7—进气口 8—排气口 9—树脂

为减小滚珠丝杠的径向圆跳动和轴向跳动对导轨直线运动的影响，可以采用螺母和工作台柔性连接的办法，即螺母装在柔性的过渡连接块上再和工作台固定。这柔性过渡连接块仅在导轨的直线运动方向 z 向有很大刚性，可以带动工作台前进后退；在和直线运动 z 向相垂直的方向（x 向和 y 向）则刚度很低，因此丝杠的径向跳动和振摆将被这柔性过渡连接块所衰减，大大减小它对导轨运动直线性的影响。图 4-25 是这种柔性的过渡连接块的结构原理图。滚珠丝杠传动副的螺母用 4 个螺钉固定在连接块的中间，它由 4 根垂直变形肋 A 悬在框架中，使螺母可作水平方向的左右移动，中间杠架由 4 根水平变形肋 B 悬在外框架中，使螺母可作垂直方向的上下移动。这过渡连接块有一定厚度，使在导轨运动方向 z 向有较大刚度，不影响导轨直线运动的驱动。

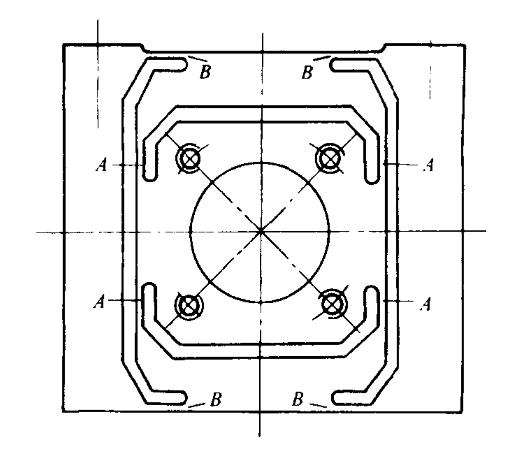


图 4-25 柔性过渡连接块

五、摩擦驱动

为进一步提高导轨运动的平稳性和精度，现在有些超精密机床的导轨驱动采用摩擦驱动，经实际应用，摩擦驱动的使用效果很好，优于滚珠丝杠副的驱动。

图 4-26 为摩擦驱动装置的原理图。和导轨运动体相连的驱动杆夹在两个摩擦轮之间。上摩擦轮是用弹簧压板压在驱动杆上，当弹簧压板压力足够时，摩擦轮和驱动杆之间将无滑动。两个摩擦轮均有静压轴承支承，可以无摩擦转动。下摩擦轮和直流电动机相连，带动下摩擦轮旋转，靠摩擦力带动驱动杆，带动导轨作非常平稳的直线运动。

这种摩擦驱动装置主要的技术难点有：1）超精密机床在精切时，要求导轨的运动速度极慢，因此要求下摩擦轮直径很小，造成一定的结构设计困难；2）两个摩擦轮最好都能采用静压轴承支承，但是从结构位置上看，放两套静压轴承（液体或空气）空间位置太挤，结构设计有很大困难；摩擦轮如用滚动轴承支承，则滚动轴承有摩擦，会降低摩擦驱动装置的平稳性，降低导轨直线运动的平稳性。

图 4-27 是另一种摩擦驱动装置的结构，这种摩擦驱动装置，只有一个和直流电动机相连的摩擦轮带动驱动杆。驱动杆下平面为气浮导轨面，由空气压力将驱动杆压紧在摩擦轮上。这摩擦驱动装置中，摩擦轮是由滚动轴承支承的。

现在国外已有几台大型超精密机床的导轨驱动使用摩擦驱动，据报道机床导轨的直线运动非常平稳并且达到极高的直线运动精度。

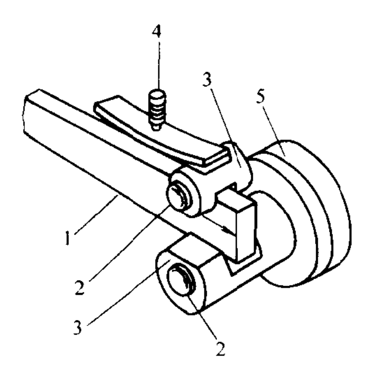


图 4-26 双摩擦轮摩擦驱动装置
1—驱动杆 2—摩擦轮
3—静压轴承 4—弹簧压块
5—驱动电机

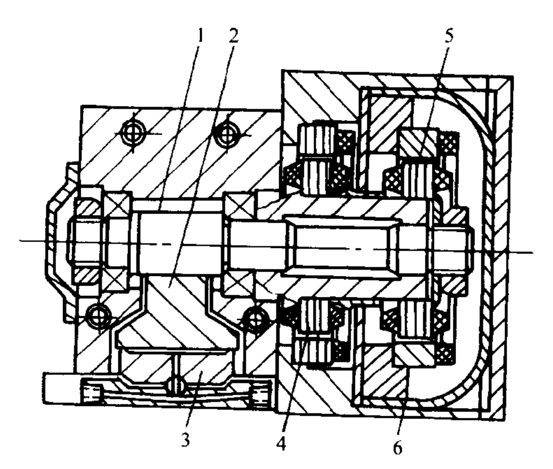


图 4-27 摩擦轮和气浮导轨支承摩擦驱动装置
1—摩擦驱动轮 2—驱动杆 3—静压支承座
4—电动机 5—测角系统 6—压盖

第六节 微量进给装置

一、对微量进给装置的要求

在超精密机床和超精密加工中，为使机床微位移的分辨力进一步提高；为进行机床和加工误差的在线补偿，以提高加工的形状精度；为进行某些特殊的非轴对称表面的加工，都需要使用微量进给装置。高精度微量进给装置现在已成为超精密机床的一个重要的关键装置，重要的机床附件。现在高精度微量进给装置已可达到分辨力 0.001～0.01μm，这对实现超薄切削、实现高精度尺寸加工和实现在线误差补偿是十分有用的。

在超精密加工中，高精度微量进给装置上夹固金刚石刀具，要求实现精确、稳定、可靠和快速微位移，因此一个好的精密和超精密微位移机构应满足下列设计要求：

1）精微进给和粗进给应分开，以提高微位移的精度、分辨力和稳定性。

2）运动部分必须是低摩擦和高稳定度的，以便实现很高的重复精度。

3）末级传动元件必须有很高的刚度，即夹金刚石刀具处必须是高刚度的。

4）微量进给机构内部联接必须是可靠联接，尽量采用整体结构或刚性联接，否则这微量进给机构很难实现很高的重复精度。

5）工艺性好，容易制造。例如要实现 0.005～0.01μm 的微进给，微量进给机构本身各部分的精度，应是能够制造的精度。

6）微量进给机构应具有好的动特性，即具有高的频响。

7）微量进给机构应能实现微进给的自动控制。

现在用的微量进给装置有多种结构型式，多种工作原理，归纳起来有下面 6 种类型：1）

机械传动或液压传动式、2）弹性变形式，3）热变形式，4）流体膜变形式，5）磁致伸缩式，6）电致伸缩式。根据精密和超精密微量进给装置的要求，上述6种类型中，仅有弹性变形式和电致伸缩式微量进给机构比较适用，并比较成熟。尤其是电致伸缩微量进给装置，可以进行自动化控制，有较好的动态特性，可以用于误差在线补偿。

下面将分别介绍弹性变形和电致伸缩式微量进给装置。

二、机械结构弹性变形微量进给装置

机械结构弹性变形微量进给装置，工作稳定可靠，精度重复性好，在手动操作时，此种微量进给装置是很合用的。

图4-28介绍一种双T形弹性变形微进给装置的工作原理如图所示。当驱动螺钉前进时，T形弹簧1变直伸长，因B端固定，C端压向T形弹簧2。T形弹簧2的D端固定，故推动E端可位移刀夹作微位移前进。

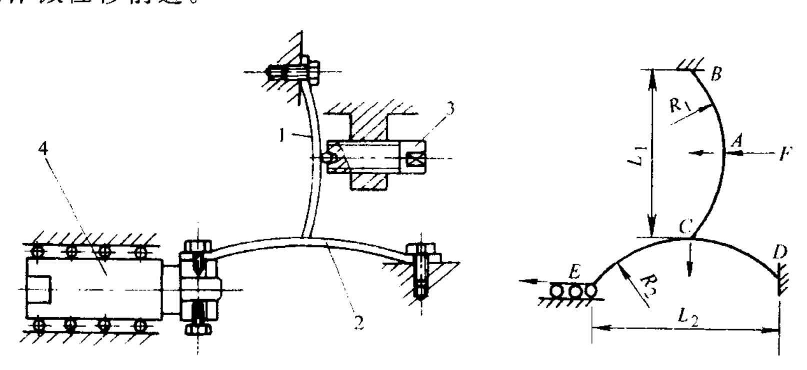


图4-28　双T形弹性变形微进给装置原理

1—T形弹簧1　2—T形弹簧2　3—驱动螺钉　4—微位移刀夹

该微量进给装置分辨力为0.01μm。经实测重复精度0.02μm，最大输出位移是20μm，输出位移方向的静刚度为70N/μm，经实际切削刚度足够，使用此微量进给装置和原来不用时作切削比较，看不出加工表面粗糙度有变化。

三、压电和电致伸缩传感器微进给装置

要实现自动微量进给和要求微量进给装置有较好动特性时，现在都采用压电或电致伸缩微量进给装置。电致伸缩传感器、微量进给装置的机械结构和它的驱动电源是电致伸缩微量进给装置的三大关键技术。

1. 压电和电致伸缩传感器的材料

电致伸缩陶瓷有逆压电效应和电致伸缩效应，这是电介质在电场作用下产生变形的基本电偶合效应。电致伸缩效应的变形量与电场强度的平方成正比。电致伸缩传感器用于制造微量进给机构有很多优点：1）能够实现高刚度无间隙位移；2）能实现极精细的微量位移，分辨力可达1.0～2.5nm；3）变形系数较大；4）有很高的响应频率，其响应时间达100μs；5）无空耗电流发热问题。因此，电致伸缩陶瓷微量进给机构的研究在国内外都倍受重视。

过去常用的电致伸缩材料为压电陶瓷PZT（PbZnO—PbT陶瓷）等，这材料具有很好的电致伸缩性能。最近美国AVX公司推出一种新的电致伸缩陶瓷材料，其性能要比PZT陶瓷材料好很多。

当电致伸缩陶瓷片一侧通正电，一侧通负电，陶瓷片在静电场作用下将伸长，当静电场的电压增加时，伸长量亦增大。

压电陶瓷具有电致伸缩性能，但其伸长量和电场的极性有关，例如当正电场时压电材料伸长，负电场时压电材料将缩短。但新的电致伸缩材料的伸长则和电场的极性无关，即无论是正电场或负电场，电压的绝对值增加时它的伸长量都将增大。现在生产中仍有不少使用压电传感器作电致伸缩元件的。

电致伸缩陶瓷片的伸长量实际是和它的表面的电荷量成比列，当静压场电压增高时，电荷的密度增加，使伸长量增加。为增加总伸长量，采取很多陶瓷薄片叠在一起的办法，使各陶瓷片的伸长量加在一起。

2. 电致伸缩传感器的结构和性能

平时电致伸缩陶瓷片两片成一对，中间通正电，两侧通负电，将很多对陶瓷片叠在一起，正极联在一起，负极联在一起，即组成一个电致伸缩传感器，如图 4-29 所示。

美国 AVX 公司生产的电致伸缩传感器外形有圆柱形和方柱形，如图 4-30 所示。该公司生产的标准电致伸缩传感器的尺寸见表 4-7。

该电致伸缩传感器的主要性能指标，以外径 ϕ6mm、长 15mm 的传感器为例，列于表 4-8 中。

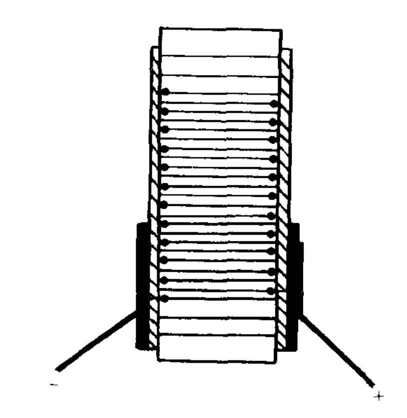


图 4-29 电致伸缩传感器工作原理

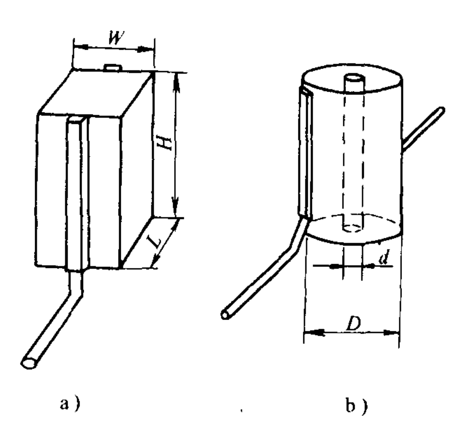


图 4-30 电致伸缩传感器外形尺寸
a) 方柱形 b) 圆柱形

表 4-7 美国 AVX 公司生产的电致伸缩传感器

型	号	D	d	H	伸长量/μm	电容量/μF
圆柱形	C060210A	6	2	10	8	2
	C060315A	6	3	15	12	3
	C060320A	6	0	20	15	5
		L	W	H		
方柱形	R020305A	2	3	5	3	0.2
	R050510A	5	5	10	7	4
	R060620A	6	6	20	15	6
	R101020A	10	10	20	15	15

表 4-8 典型电致伸缩传感器（ϕ6mm，长 15mm）的主要性能

电容	3μF	在 40℃ 时最大，达 5μF
自振频率	100Hz	在最大伸长时下降 10%
最大伸长量	12μm	在电压为 150V 时
承受最大压力	750N	将使最大伸长量减少 10%
滞后	2%	在 40℃ 时将减小为 1%
蠕变	2%	24 小时的最大量
使用温度	0～40℃	保持 50% 的伸长量
温度膨胀系数	10^{-6}/℃	在使用温度内
弹性模量	16×10^{6}	在 25℃ 时
最大拉伸力	350N	在 25℃ 时的断裂值
响应时间	<100μs	全伸长量

图 4-31 中给出电致伸缩传感器在不同电压时的伸长量的关系曲线，可看到在加上直流电压时，无论是正电压或负电压，传感器的伸长量是相同的。这曲线的中间部份线性是比较好的。

图 4-31 中同时给出压电伸缩传感器的电压伸长量关系曲线，可看到正电压时伸长，负电压时缩短。这种传感器在电压上升下降时的伸长量滞后较长。

我国四川永川压电与声光研究所生产 PZT-La 压电伸缩传感器。这传感器的动态特性是比较好的，但是它的耐压强度较低，同时蠕变较大，还不能完全满足超精密加工中微量进给装置的要求。

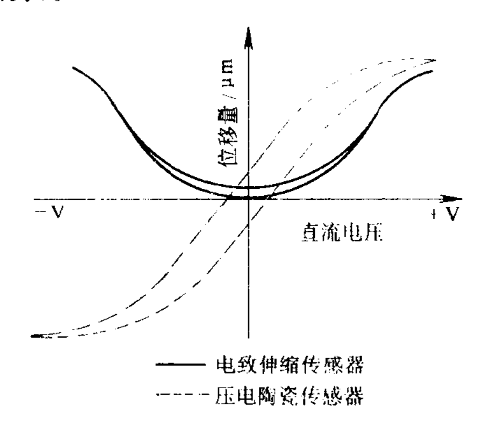


图 4-31 电致伸缩和压电陶瓷传感器的电压—伸长量关系

要提高电致伸缩传感器的动态特性，应减少传感器中的陶瓷片数，减少传感器的电容量，但这样将会减少这传感器的最大伸长量。

3. 电致伸缩式微量进给装置的结构

对电致伸缩微量进给装置机械结构的要求，主要是：有较高的刚度和自振频率，自振频率应大于 300～500Hz；调整使用方便，应能很方便的调节电致伸缩传感器的预载力；最好是整体结构，在实现微位移时应无摩擦力；结构不要太复杂，便于加工制造。

现在有多种不同结构的电致伸缩式微量进给装置的结构。图 4-32 是日本冈崎佑一研制的一种结构。压电传感器后侧为固定支承，刀架体上有 4 个圆孔和台体外侧面形成薄壁变形元件，在圆孔间用三条缝开通，使前面装车刀部分和台体间能作前后弹性变形位移。当压电传感器在电压作用下伸长时，将推动前面装刀具部分向前移动实现微位移。

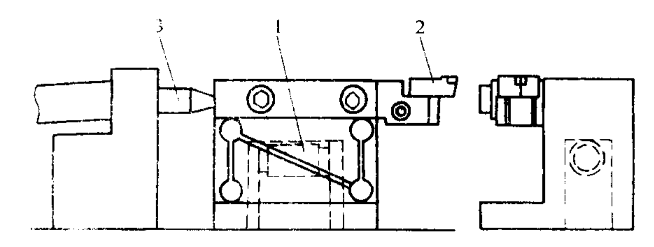


图 4-32 日本冈崎佑一的微量进给装置
1—压电伸缩传感器 2—金刚石刀具 3—测微仪

图 4-33 是美国 LLL 实验室的大型光学金刚石车床 LODTM 上使用的快速电致伸缩式微量进给装置 FTS（Fast Tool Servo）。这微量进给装置中压电伸缩传感器后端支承在固定的装置本体上。刀具装在前部为锥形后部为套筒形的位移部件上，这位移部件由前后各一薄膜（弹性变形元件）支承在固定的本体上。在 FTS 体内有两个差动式电容测微传感器随时检测微位移量的数值。当压电伸缩传感器在电压作用下向前伸长，推动前面带刀具的位移部件向前移动，实现微位移。

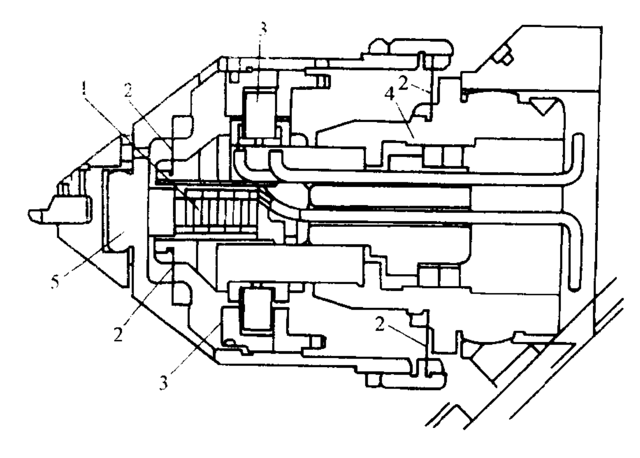


图 4-33 美国 LLL 实验室的微量进给装置
1—压电伸缩传感器 2—支承弹性膜 3—差动电容测微仪
4—基体 5—微位移部分

这 FTS 微位移装置和机床的控制系统相联，形成闭环控制系统，可用于误差补偿。装置的位移部分重量 380g，自振频率 1KHz。整个微位移装置的再现分辨率为 2.5nm，最大位移±1.27μm/100v。装置在 100Hz 以下工作时，能达到预定的性能指标。

图 4-34 为英国 Cranfield 公司的大型立式超精密机床所用的电致伸缩微量进给装置。压电伸缩传感器后端支承在装置的本体，用螺钉可以进行预载加力。这装置的位移部分由两个薄膜（弹性变形元件）支承在本体的外圆筒中。当电致伸缩传感器在电压作用下伸长时，推动带刀具的位移部分向前移动，实现微量进给。在这装置的位移部分内部，装有差动式电容测微传感器，可随时检测微进给数值。

图 4-35 为我国某单位所设计的新结构微量进给装置。这微量进给装置本体、弹性变形元件、位移进给部分是由整体材料制成，是一整体结构，这样可以避免装配接合面的接触刚度对微位移精度的影响。电致伸缩传感器后端有调节螺钉，可以很方便的调整预载力。为避免电致伸缩传感器两端受力不平行，后端用钢球加预载力，在预载力调整好后用锁紧螺母将调节螺钉锁死。电致伸缩传感器在电压作用下伸长时，推动前面的刀具的位移部分前进，实现微量进给。这微量进给装置刚性和自振频率均较高，（经实测微量进给机构的自振频率 7.8KHz），结构简单，体积小，使用方便。在使用长 15mm 的 AVX 公司电致伸缩传感器时，系统分辨率 0.01μm，最大位移 5.2μm，系统在 200Hz 下正常工作，微位移稳定可靠。

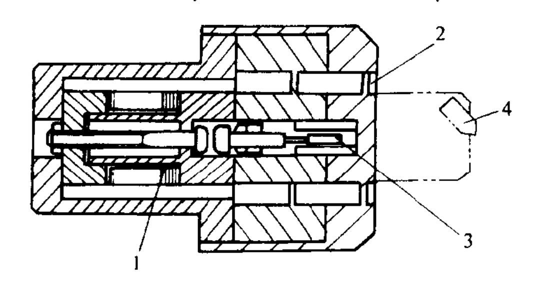


图 4-34 英国 Cranfield 的微量进给装置
1—压电伸缩传感器 2—弹性薄膜 3—差动电容测微仪 4—金刚石刀具

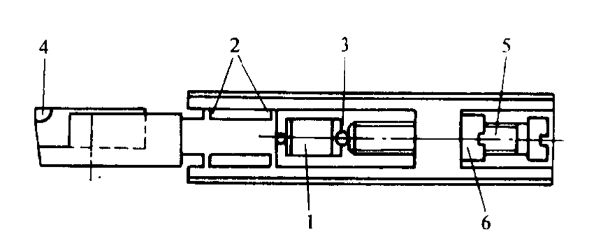


图 4-35 整体结构电致伸缩微量进给装置
1—电致伸缩传感器 2—支承弹性膜 3—钢球 4—金刚石刀具 5—预载螺钉 6—锁紧螺母

4. 电致伸缩式微量进给装置的驱动电源

要电致伸缩式微量进给装置有良好的动态特性，它的驱动电源必须有很好的动态特性，高度的稳定性和极小的波纹系数。

我国四川永川所生产的 PZT-La 压电伸缩传感器最高工作电压为 DC+300V；美国 AVX 公司生产的电致伸缩传感器最高工作电压为 DC+150V。根据电致伸缩传感器的工作动特性要求，驱动电源在接上电容负载后，电压的升高与降低应在极小的时间滞后下完成，即驱动电源应有极好的动特性，如图 4-36 所示。电致伸缩传感器在驱动电源电压的作用下，应有很快的时间响应。图 4-37 所示为图 4-35 中的电致伸缩微位移系统的动态响应和分辨率的实测结果。可看到整个系统有较好的动特性，在 200Hz 时能正常工作，微位移分辨率达到 0.01μm。

5. 微量进给装置的应用

微量进给装置在超精密加工和超精密机床上已经得到了较多的实际应用，例如美国 LLL 国家实验室的 DTM-3 大型金刚石车床和 LODTM 大型光学金刚石车床；英国 Cranfield 公司的 OAGM2500 大型超精密机床等都已采用了电致伸缩式微量进给装置。微量进给装置的应用可实现如下功能：

1）实现微量进给；

2）实现超薄切削；

3）在线误差补偿；

4）用于切削加工非轴对称特殊型面。将非轴对称特殊曲面的坐标数值输入控制微量进给装置进给量的计算机内，可加工出这种特殊曲面。

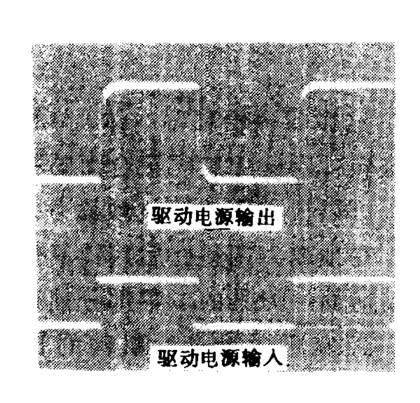


图 4-36　驱动电源的动态性能

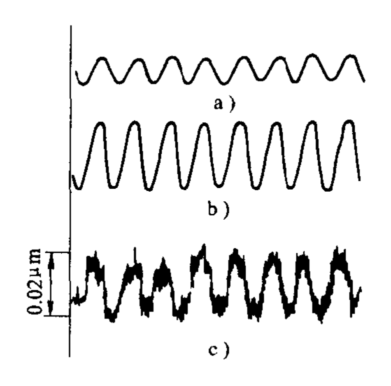


图 4-37　电致伸缩微位移系统的动态响应

a）驱动电源输入（200Hz）　b）驱动电源输出　c）系统微位移输出

第七节　机床运动部件位移的激光在线检测系统

一、激光在线检测系统的工作原理

现在国外生产的超精密机床，都装有双频激光随机检测系统，检测机床两坐标的运动部件（z 向和 x 向）的位移位置，和精密数控系统组成精密反馈控制系统，以保证加工的尺寸精度。超精密机床一般都要加工非球曲面，要求很严格的形状精度。工件的形状一般是由两坐标的精密数控系统来控制工件和刀具的相对位置。精密数控系统现在采用闭环控制，即机床的运动部件的位移用装在机床内部的双频激光干涉测距系统随机精确检测，将数据反馈给精密数控系统，保证位移运动的高精度。

二、美国 Pneumo 公司 MSG-325 超精密机床的激光检测系统

美国 Pneumo Precision 公司生产的 MSG-325 超精密金刚石车床，其位移测量光路如图 4-38 所示，双频激光测量系统采用的是美国 HP 公司生产的 HP5501 两坐标双频激光干涉测量系统。

本机床的布局为主轴箱装在纵溜板上作 z 向运动，刀架装在横溜板上作 x 向运动。双频激光发生器发出的激光经分光镜分成两路，分别测 z 向和 x 向的位移。激光测量系统的分辨率为 0.01μm。为避免激光器发热的影响，激光器是用支架支承，放在花岗岩床身的后侧面。这测量系统除移动的测量反射镜是安装在移动部件随主轴箱和刀架移动外，其余整个测量系统是固定安装在花岗岩床身上，因此这样的机床布局，z 向和 x 向测量互不干扰，大部分测量系统可固定安装，是有利于提高测量精度的。激光测量光路安放主轴轴

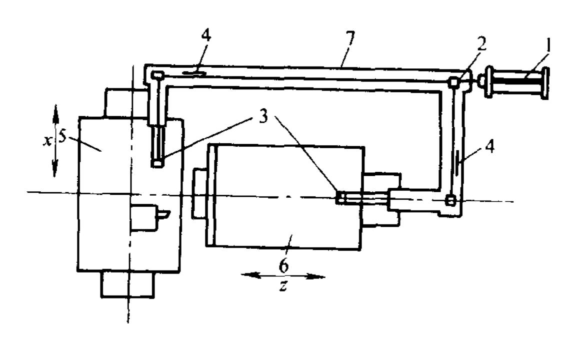


图 4-38　美国 Pneumo 公司 MSG-325 超精密金刚石车床的位移激光检测系统

1　激光器　2—分光镜　3—移动棱镜　4—接收器　5—横滑板　6—纵滑板　7—封闭罩

线的高度以减少阿贝误差。大部分激光光路采用封闭，移动部分也用活动套管封起使环境干扰尽量减小。这套激光位移测量系统的绝对测量精度小于 0.1μm。

三、三坐标测量机用激光位移测量系统

图 4-39 所示为坐标测量机所用的三路位移激光测量系统。激光器 1 出来的激光经分光镜 2 分成测 x、y、z 三个方向位移的三路激光位移测量系统。现在世界各国生产的精密三坐标测量机都装有激光位移测量系统，测量精度在 0.1μm。坐标测量机装上了激光位移在线测量系统后，不仅提高了测量精度，而且可以实现测量的自动化。现代的柔性制造系统（FMS）中不少装备了坐标测量，实现了加工和检测的自动化。

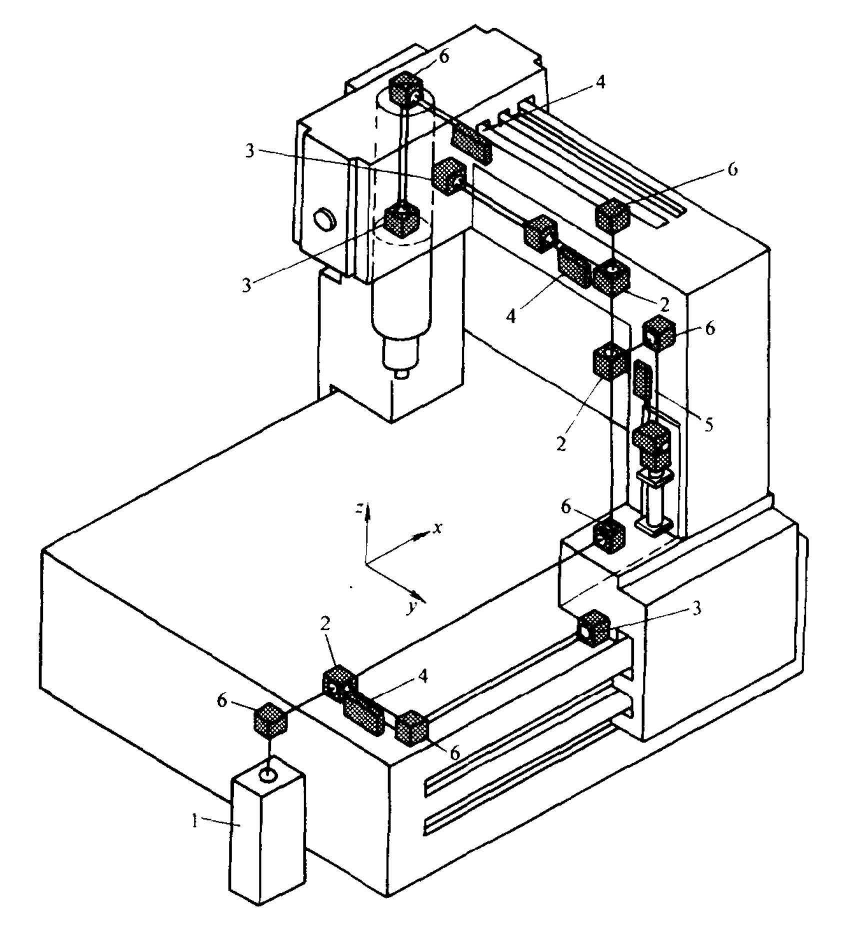


图 4-39　三坐标测量机的激光位移在线测量系统

1—激光器　2—分光镜　3—移动棱镜　4—接收器

5—参考基准　6—45°反射镜

四、美国 LLL 国家实验室 LODTM 大型光学金刚石车床激光测量系统

大型的超精密机床，为检测大部件运动时不产生歪斜，有时用两路（甚至 3～4 路）激光测量仪来检测同一部件的运动位移。美国 LLL 实验室的 LODTM 大型超精密机床中，就使用多路双频激光测量仪来检测两个方向的运动。从图 4-5 可看到该机床系立车形式。大溜座（重 1.8 吨）在机床的横梁导轨上作水平的 x 向运动；刀座（200kg）在溜座的导轨上作垂直的 z 向运动。使用双频激光干涉测距系统对 x 向和 z 向位移进行检测，双频激光检测系统的总体布局如图 4-40 所示。系统中共有 7 路双频激光测量系统，共用一套双频氦氖激光器作为激光源经分光镜分成不同光路。在机床横梁的左端有独立的检测基架（用热膨胀系数很低的铟钢制造），上面装 4 路激光测量仪，在大溜座上有相应的反射镜监测溜座的水平“x 向”位移，用四路激光测量仪的原因是防止溜座运动时的歪斜。在溜座的顶部装有三路激光测量仪，检测刀座的垂直“z 向”位移，使用三路激光测量仪的原因也是要防止刀座运动时的歪斜。采用上述多路双频激光干涉测量系统，在机床切削工件时，七路激光测量仪测得的溜板、刀架位移数值、输入计算机内，经一定的数学模型公式计算，可以得到刀尖的空间精确位置，反馈控制机床的精密数控系统，达到极高的刀尖运动位移精度，达到极高的加工形状精度。

这台大型光学金刚石车床LODTM所用的激光干涉测量仪是专门研制的SP125型双频激光干涉测量仪，输出光功率为15mw，当分光为7路激光时，每路激光仍有足够的功率。采用碘稳频，具有很高的频率稳定性，分辨率为6.35A。

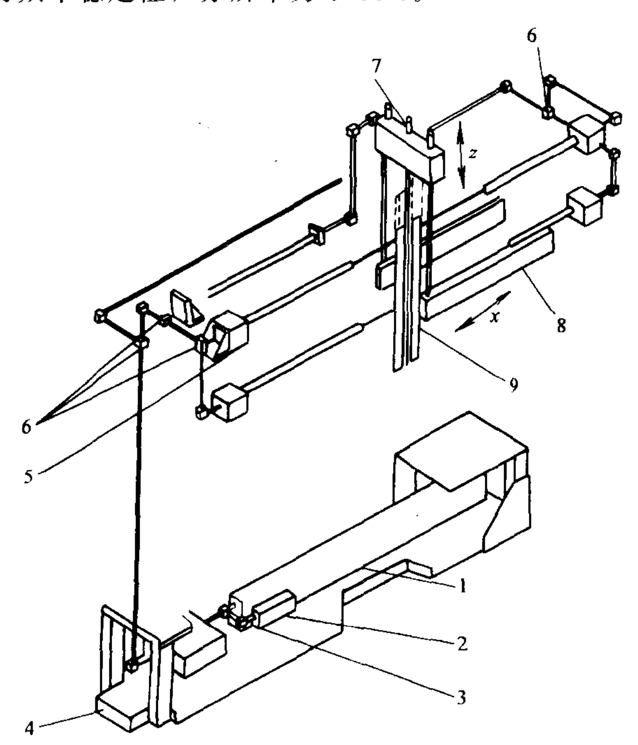


图4-40 大型超精密机床LODTM的位移激光检测系统
1—SP125 He/Ne激光器 2—经碘稳定的He/Ne激光
3—检测器反馈 4—基座 5—测大滑板运动的4路激光
（未全画出） 6—分光镜 7—测刀架运动的3路激光
8—测z向运动直尺 9—测x向运动直尺

第八节 机床的稳定性和减振隔振

一、机床的稳定性

精密和超精密机床要求高稳定的机床结构，即各部件尺寸稳定性好、刚度高、变形小、结构的抗振减振性能好。

1. 各部件的尺寸稳定性好

1）采用尺寸稳定性好的材料制造机床部件，如用陶瓷、花岗岩、尺寸稳定性好的钢材、合金铸铁等。

2）各部件经过消除应力：时效、冰冷处理、铸件缓慢冷却等方法使部件有高度的尺寸稳定性。

2. 结构刚性高，变形小

1）当机床运动部件位置改变，工件装卸或负载变化，受力作用变化等，均将造成变形。要求结构刚度高、变形量极小，基本不影响加工精度。

2）各接触面和联接面的接触良好，接触刚度高，变形极小。

二、提高机床结构的抗振性和消除减少机床内的振动

超精密机床使用金刚石刀具作超精密切削时，要求机床工作时极其平稳，不允许有振动，因此必须尽量减少机床内部所有的振动。为此：

1. 各运动部件都经过精密动平衡，消灭或减少机床内部的振源

机床内的主要振源是高速转动的部件，如电机、主轴等，这些转动的部件必须经过精密动平衡，使振动减小到最低；有可能产生振动的还有电机和主轴的不同心，空气轴承的振荡，滚珠丝杠和螺母的不同心，导轨运动部件直线运动速度的变化，加工工件有偏心重量等。当发现机床有振动时，必须要找出振源，尽量消除减少振动。

2. 提高机床结构的抗振性

使用很大的机床床身以降低它的自振频率，例如美国LLL实验室的DTM-3大型超精密机床使用6.4m×4.6m×1.5m的巨大花岗岩做床身（价5万美元）。

如有振动产生，应找到机床结构中易于产生振动的薄弱环节，予以加强，使振动减小。

3. 在机床结构的易振动部份，人为的加入阻尼，减小振动。

4. 使用振动衰减能力强的材料制造机床的结构件。

在前面表4-5中给出了几种常用材料振动的衰减率，可以看到铸铁对振动的衰减率高于钢材，花岗岩对振动的衰减率大大高于钢铁。人造花岗岩的振动衰减率又高于天然花岗岩。

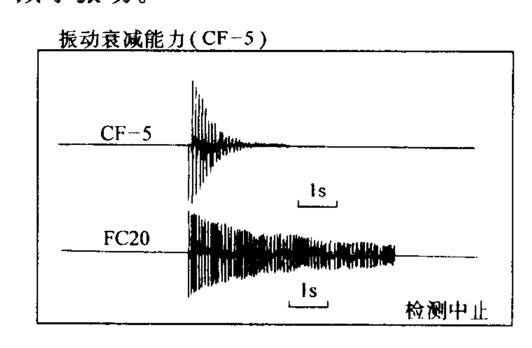


图4-41　CF-5铸铁的振动衰减能力

日本夏本铸工所最近推出几种新牌号线膨胀系数很低的Nobinite铸铁，其中有些牌号具有很好的振动衰减能力，图4-41所示是其中的CF-5铸铁的振动衰减波形图，可看到要比普通铸铁FC20的振动衰减能力强很多。

由于花岗岩有很好的振动衰减能力和比钢铁低的热膨胀系数，现在很多的超精密机床和三坐标测量的床身和溜板已采用花岗岩制造，获得较好的使用效果。人造花岗岩的振动衰减能力又比花岗岩高不少，瑞士Studer公司用人造花岗岩Granitan制造高精度S系列磨床的床身，效果甚佳，已成为专利，在其他工厂中推广使用。英国Cranfield公司的OAGM2500大型精密机床，床身采用焊接钢结构，中间用人造花岗岩填充，有很好的振动衰减能力。

三、隔离振源，使用隔振沟、隔振墙和空气隔振垫以减少外界振动的影响

1. 超精密机床应尽量远离振源

机床附近的振源，如空压机、泵等应尽量移走。实在无法移走时，应采用单独地基，加隔振材料等措施，使这些无法移走的振源所产生的振动对精加工的影响尽量减小。

美国LLL实验室的LODTM大型超精密车床使用大量的恒温水通到机床的各部分，以保持机床的恒温。为避免恒温水的水泵的振动影响超精密机床，采取如下措施，水泵将恒温水打到水箱中，靠自重恒温水从水箱流到超精密机床的各有关部分，这样水泵的振动将不影响超精密机床。

2. 超精密机床采用单独地基，隔振沟、隔振墙等

为减少外界振动的干扰，地基应有足够的深度，地基周围用隔振沟，沟中使用吸振材料。过去为防止外界振动的传入，有使用弹簧将地基架起来，它的隔振频率不够低，且不能自动

找水平，故现在用得不多。

美国LLL实验室的LODTM大型超精密车床，除机床用带隔振沟的地基外，机床装在有隔墙的单独房间内。这隔墙是双层的，中有吸音材料，可以减少声波振动的影响。

3. 使用空气隔振垫（亦称空气弹簧）

现在超精密机床和精密测量平台底下都用能自动找水平的空气隔振垫，一般可以隔离2Hz以上的外界振动。例如Moore公司的M-18AG超精密车床和Pneumo公司的MSG-325超精密车床都是机床下用三个能自动找水平的空气隔振垫支承。从图4-2中的Moore车床可以看到这种空气隔振垫，它可隔离频率2Hz以上的外界振动。美国LLL实验室LODTM大型超精密机床用四个很大的空气隔振垫将机床架起来，从图4-42中可看到这些空气隔振垫，这空气隔振垫可以自动保持机床水平。这四个空气隔振垫中有两个是内部相连的，受力时能自动平衡，这样用四个空气隔振垫可以起到三点支承一平面的效果。美国LLL实验室的DTM-3大型超精密机床使用空气隔振垫后，可以隔离频率大于1.5～2Hz的外界振动，隔振后轴承部件的相对振动振幅仅2nm。

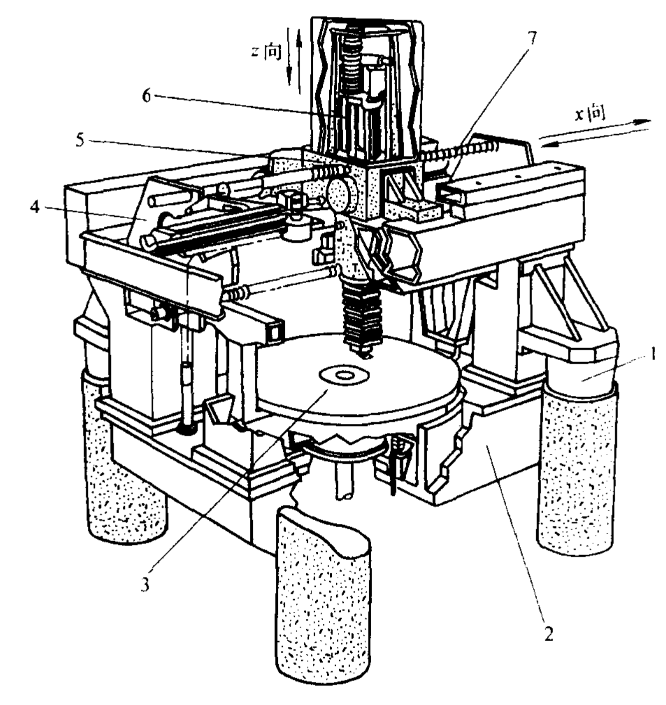


图4-42　美国LLL实验室LODTM大型超精密机床的支承
1—隔振空气弹簧　2—床身　3—工作台（直径1.5m）　4—测量基准架　5—溜板　6—刀座（有重量平衡）行程0.5m　7—激光通路波纹管

图4-2中的Moore超精密机床等中小型机床的空隔振垫一般都是放在机床床身下面，而图4-42中的LODTM大型超精密机床的空气隔振垫是架在机床上较高的位置，空气隔振垫本身是放在很高的基础上的。这两种空气隔振垫不同的支承方案对机床的抗振性有较大的影响。图4-43是两种空气隔振垫支承机床不同方案的对比原理图。从图可以明显看到，当空气隔振垫支承在机床较高位置时比在机床床底支承，可以明显降低机床的重心，使机床更稳定不易产生振动。此外在机床有振动时，如支承点在机床底面，刀具切削工件位置将有较大振幅；而在高位支承，刀具切工件位置是处在中心点，振幅要小得多。刀具切工件位置是振动的敏感区，因此可以说高位支承将使机床的抗振性提高，增加机床的稳定性。

机床使用空气隔振垫后需要有自动找水平的控制系统，必须在机床运动部件移动重心改变时，仍能保持水平。可以在机床床身上安放位置相互垂直的两个电子水平仪。当机床上的运动部件移动时，由于重心改变而导致倾斜，这时电子水平仪发生信号，由控制系统分别调整空气隔振垫的空气压力，使机床恢复水平位置。由于电子水平仪有不同的精度等级、可以根据需要选择，使机床的水平度达到要求。

超精密机床用的空气隔振垫（空气弹簧）有较大的技术难度。它要求能隔离很低频率的振动（1.5～2Hz），故空气隔振垫必须做得很软，自振频率才能很低。同时它要求不产生振荡

摇摆，机床在重心改变产生倾斜时，要迅速恢复水平，不振荡，这要求空气隔振垫内有很大的阻尼。

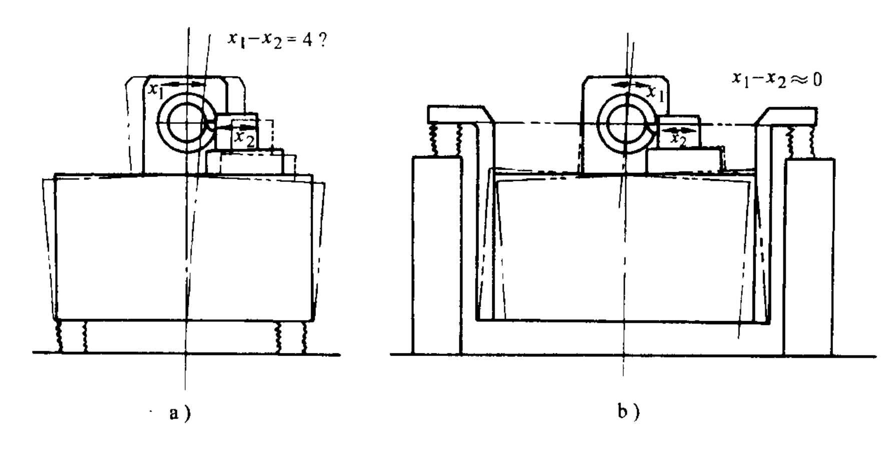


图 4-43　空气隔振垫支承位置不同对抗振性的影响
a）床底支承　b）上部支承

第九节　减少热变形和恒温控制

一、温度变化对精密机床和精密加工误差的影响

据文献统计，精密加工中机床热变形和工件温升引起的加工误差占总误差的 40%～70%。在一般机械加工中，磨床润滑油和磨削液每日变化 10℃ 是常见的现象，如磨削 ϕ100 的零件，温升 10℃ 将产生 11μm 的误差。为此日本 FCG32/10-NC-MACO 无人化适应控制 NC 高速磨床就配有油温控制和自动补偿系统。精密加工铝合金零件 100mm 长时，每温度变化 1℃，将产生 2.25μm 的误差。若要求确保 0.1μm 的加工精度，环境温度就需要控制在±0.05℃范围内。

1977 年美国空军兵器研究所（AFWL）和 Y-12 工厂合作研制精度为 0.1μm 级加工直径 ϕ800mm 的非球曲面加工机床，要求控制机床主轴热伸长为 0.05μm，机床热变形误差控制指标为 0.05μm。

日本 1983 年成立了“纳米技术调查委员会”，于 1985 年 7 月发表超精密加工技术未来发展研究项目报告书，其中一项为“超精密温度控制系统”。

现在许多精密和超精密机床都装有高精度温控系统和热误差自动补偿装置。美国 LLL 实验室对机床热变形进行了基础性研究，在其试验条件下证明，相对位移量与油温呈比例变化，油温变化 0.056℃ 时，热变形为 0.19μm，在温度变化 0.006℃ 时，热变形误差为 0.019μm，从这结果可看到要提高机床的加工精度，必须严格控制温度变化。

二、减小机床热变形的措施

1）尽量减少机床中的热源：如机床主轴采用空气轴承代替液体静压轴承以减少发热量、使用发热量小的电动机；将发热器件放在机床床身外，如进给电动机和激光管放在机床床身外侧等。

2）采用热膨胀系数小的材料制造机床部件，例如现在不少坐标测量机和超精密机床使用花岗岩、铟钢、陶瓷、铟钢铸铁、低热膨胀系数的铸铁等做机床的关键部件。日本夏本铸工

所最近推出几种低热膨胀系数的铸铁，从图 4-44 中可以看到这些新牌号的铸铁的热膨胀系数是普通铸铁线膨胀系数的 1/3～1/6。

现在已有少数机床主轴部件用铟钢制造；用陶瓷制造；用热膨胀系数接近于零的微晶玻璃制造；用花岗岩制造。超精密机床的床身和导轨用花岗岩制造，用低热膨胀系数的铸铁制造。LLL 实验室的 LODTM 大型超精密机床中有不少关键零件，如激光测量系统的基准测量架等，用铟钢制造。

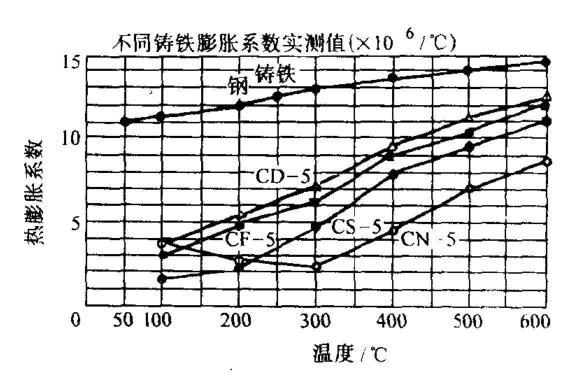


图 4-44　日本夏本铸工所的低线膨胀系数铸铁

3）结构合理化使在同样的温度变化条件下，机床的热变形最小。

4）使机床长期处在热平衡状态，使热变形量成为恒定。例如某精密机床在主轴边上加一可调热源，当机床主轴最高转速发热量最大时，附加热源不工作。当主轴为某中间转速时，附加热源供热，使总热量达到机床最高转速时产生的热量。当主轴不转时，附加热源产生热量最大，仍保持总热量恒定，夜间机床不用时，附加热源继续供热，使机床主轴一直处在热平衡状态，保持机床的高精度。

5）使用大量恒温液体浇淋，形成机床附近局部地区小环境的精密恒温。

精密和超精密机床要保持恒温可用大量的恒温油（或恒温水）浇淋切削区、关键部件或整个机床。例如有的精密丝杠车床和丝杠磨床的母丝杠做成带内孔的，工作时用恒温油通过丝杠内孔，使母丝杠保持恒温，从而提高了加工丝杠的螺距精度。

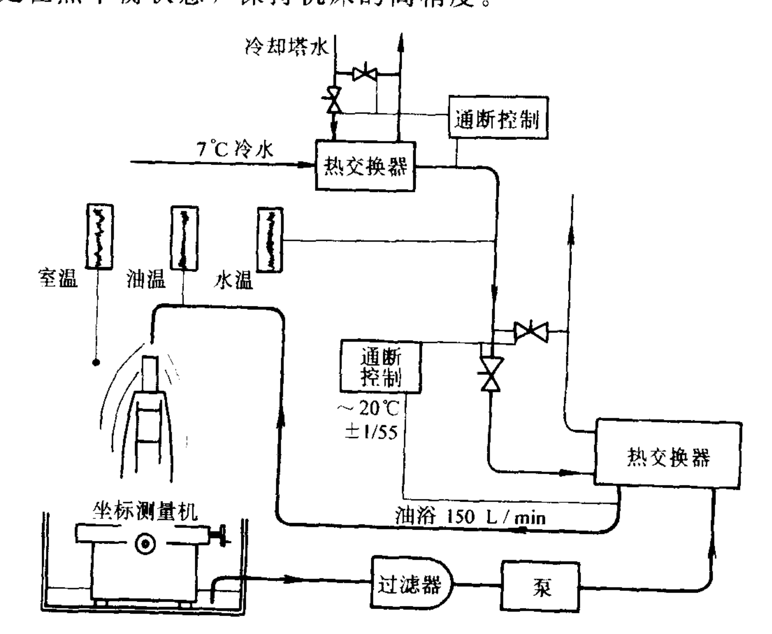


图 4-45　浇淋油的温控系统，保持油温变化不超过 20±0.0055℃（30s 的平均值）

在使用三坐标测量机测量时，操作人员对环境温度有影响，工件和环境温度的波动变化将直接影响测量精度，造成测量误差。采用恒温油对测量机浇淋，可明显地减小温度的波动，提高测量精度。美国 LLL 实验室曾对三坐标测量机进行浇淋恒温油的对比试验。图 4-45 所示为实验时采用恒温油对三坐标测量机进行浇淋时，恒温油的控制系统。此系统可控制油温在 20℃±0.0055℃。使用恒温油浇淋前，测量机附近的空气温度波动情况以及被测件（200mm 铝棒）尺寸的变化波动情况，如图 4-46a 所示；使用恒温油浇淋后，空气温度波动和被测件尺寸变化见图 4-46b。可以看到使用恒温油浇淋后，测量机附近的局部小环境内，空气温度的变化要小得多，在平均温度（20℃）的上下波动，由于温度稳定，被测的 200mm 铝件的尺寸变化很小，尺寸基本稳定，由热变形引起的尺寸测量误差很小。超精密机床希望尽可

能地减少热变形，因此要求极严格的恒温控制。很多现代的超精密机床都采用大量恒温油浇淋整个机床的措施。例如美国 Moore 公司的 M-18AG 超精密车床有粗细不等的很多油管，如蛛网般通到机床的各部份，浇淋充分的恒温油，使机床保持恒温。

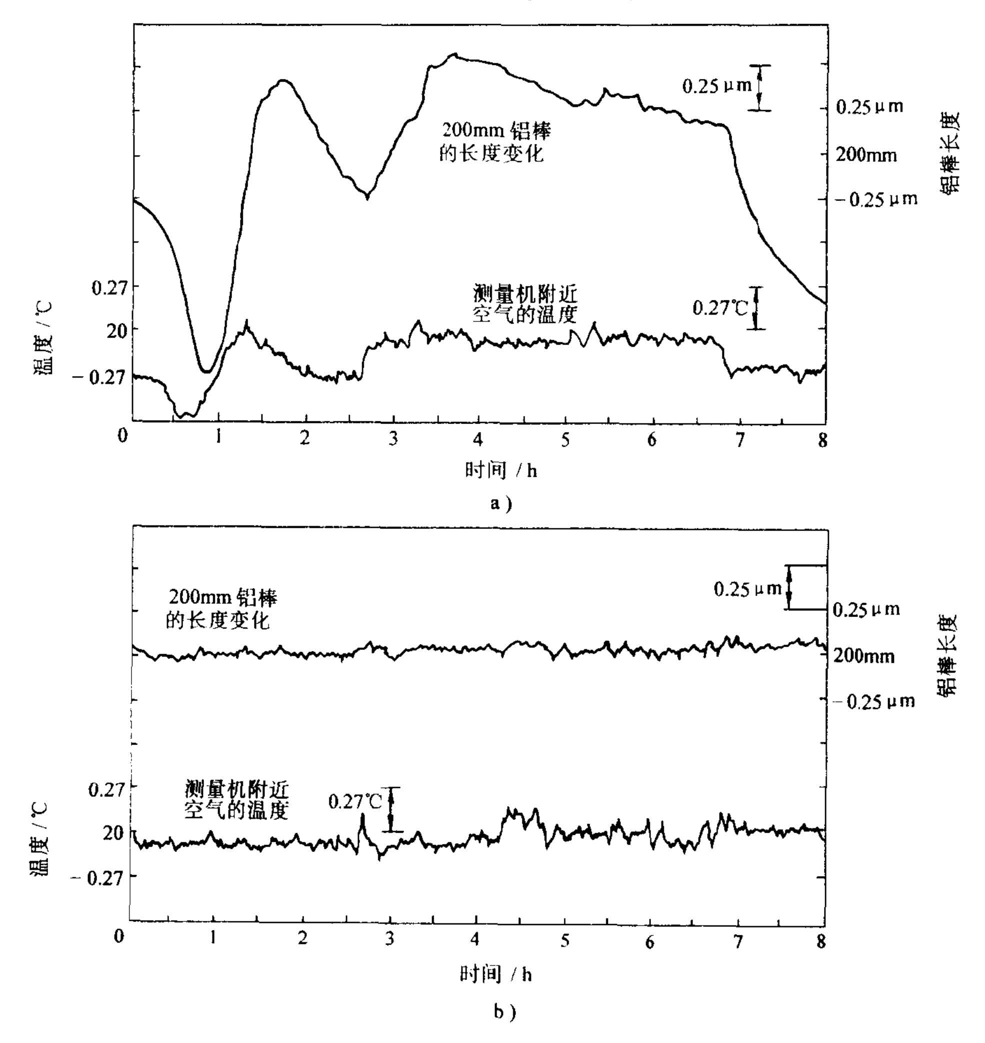


图 4-46 使用恒温油浇淋前后，测量机附近空气温度波动和被测件（200mm 铝棒）尺寸变化

a）未用油浇淋 b）用油浇淋

三、美 LLL 实验室 LODTM 大型超精密车床的恒温控制

美国 LLL 实验室放置超精密车床的恒温室，一般是用铝制框架和绝热塑料护墙板做成的。操作者和机床间有透明塑料窗帘隔开，这样可以防止周围空气侵入，可使机床附近局部空间恒温更为稳定。

安装 LODTM 机床的恒温室内，通循环的恒温空气，气流量 $90m^3/min$。通风用离心式风机的 19kW 电机是该封闭系统内最大的热源。使用两级水冷式热交换器，用测热传感器测进入的空气的温度，反馈控制热交换器的水流量，空气温度可控制在±0.005℃ 的变化范围内。图 4-47 所示是 LODTM 机床周围的典型空气温度测量记录，可说明该机床环境温度的高度稳定程度。

LODTM 机床的重要部件的温度是直接用恒温水流来控制的。主轴的径向和止推轴承都是带夹层的，可以通过恒温水流；横梁上的锢钢检测基架也是中空可以通过恒温水流。进入

机床的恒温水，流量为6.3L/s。通过热交换器，改变冰冷水的流量，可以使恒温水的温度变化控制在20℃±0.0005℃内。图4-48是所用恒温水的典型水温测量记录，可见到水温波动变化极小。恒温水是从水箱靠重力流入机床的，而不是用泵压入，这样可以避免泵的振动通过恒温水流而传到机床来。

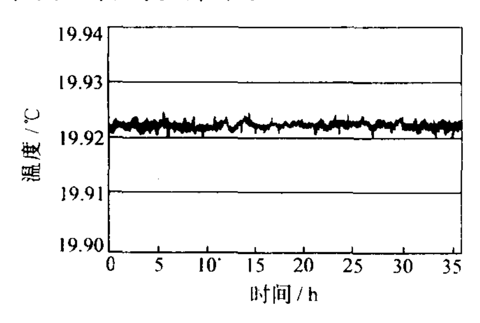


图4-47　LODTM机床周围的典型空气温度测量记录

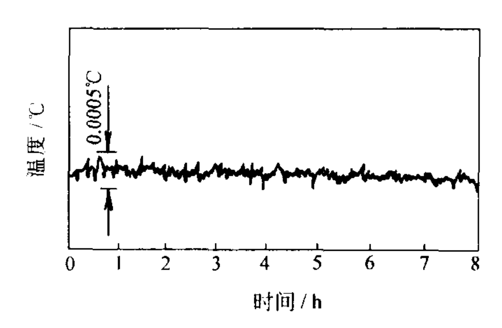


图4-48　LODTM机床用恒温水的典型水温测量记录

复习思考题

4-1　试述精密和超精密机床的国内外发展概况。

4-2　试述我国发展超精密机床概况。

4-3　以美国为例，说明超精密机床的发展过程。

4-4　能代表超精密机床最高水平的是那几台超精密机床？

4-5　试述美国LLL实验是生产的DTM-3大型超精密车床的主要技术性能。

4-6　试述美国LLL实验是生产的LODTM大型光学金刚石车床的主要技术性能。

4-7　试述英国Cranfield公司生产的OAGM2500大型超精密机床的主要技术性能。

4-8　举实例说明发展高效专用多功能超精密机床的必要性。

4-9　为什么超精密机床大部分都采用空气轴承，它有哪些优点？

4-10　空气轴主轴承有哪些常用的结构型式？它有哪些优点？

4-11　超精密主轴有哪些驱动方式？各自的优缺点是什么？

4-12　超精密车床有哪几种总体布局？各自的缺点是什么？

4-13　简述精密和超精密机床使用的床身和导轨材料，并说明各自的优缺点。

4-14　简述精密和超精密机床的导轨结构形式，并说明各自的优缺点。

4-15　试述滚珠丝杠驱动系统的结构和优缺点。

4-16　试述超精密机床中使用的摩擦驱动机构的原理，结构和优缺点。

4-17　精密加工对微量进给装置的性能要求是什么？

4-18　试述压电和电致伸缩传感器的结构和主要性能。

4-19　介绍几种典型的压电式或电致伸缩式微进给装置的原理、结构和性能。

4-20　介绍一种两坐标部件位移的激光在线检测系统。

4-21　介绍一种三坐标部件位移的激光在线检测系统。

4-22　提高机床结构的抗振性和减少机床内部振动有哪些办法？

4-23　精密和超精密机床的隔振防振措施有哪些？

4-24　试述温度变化对精密机床和精密加工误差的影响。

4-25　减少机床热变形的措施有哪些？

4-26　美国LLL实验室对大型超精密车床如何进行恒温控制？达到什么水平？

第五章　精密加工中的测量技术

第一节　精密测量技术概述

一、精密测量技术的新发展

精密测量是精密加工中的重要组成部分，精密加工的精度要依靠测量精度来保证。测量精度一般应比被测件的精度高一数量级。由于技术发展特别是尖端技术的发展，要求加工精度不断提高，这就需要更高的测量精度，使测量技术面临新的挑战。近年来测量技术的发展主要在下面几方面：

1. 极高精度测量方法和测量仪器的发展

近年研制成功测量长度时能达到Å级的双频激光测量系统和X射线干涉仪等；测量表面微观形貌达Å级的扫描隧道显微镜和原子力显微镜等；测量角度达到0.01″的精密测角仪等。

2. 精密在线自动测量技术的发展

新的三坐标测量机都有精密数控系统，可以自动完成复杂零件的全部测量，已是FMS中常用的测量装备。在大量大批生产中使用着多种专用的自动仪量，不仅提高了测量效率，而且保证了测量精度。

3. 测量数据的自动采集处理技术的发展

现在微电子技术、计算机技术已广泛应用在精密测量中，测量结果已普遍采用数字显示。很多测量仪器已配备数据处理软件，使一些复杂的测量结果，数据处理后可以很直观的显示在计算机屏幕上，并打印出来。

二、精密测量的环境条件

要获得精确可靠的测量结果，除了要有精密的测量仪器和正确的测量方法外，还必须有稳定和合适的测量环境条件：

1. 恒温条件

由于各种工程材料都有热膨胀，恒温是精密测量的必要条件。标准测量温度是20℃，可根据测量精度确定允许的温度波动。表5-1是几种常用的工程材料的线膨胀系数。如加工车间内不是标准温度(20℃)，有时被测零件不是室温，这时测出的零件尺寸，需要考虑温度变化造成的测量尺寸误差，在测量结果中给予修正。

表5-1　几种工程材料的线膨胀系数

材料	线膨胀系数 /[μm·(100mm·℃)$^{-1}$]
铝	2.214
青铜	1.782
钢	1.116
铸铁	1.08
TiC	0.591
铟钢	0.27

2. 隔振条件

进行精密测量时要避免振动引起的测量误差。应尽可能采取各种减振隔振措施。

3. 气压、自重、运动加速度和其他环境条件

当测量达到极高精度时，一些平时不考虑的问题也会影响测量精度。例如1m长的钢棒在

真空中的长度较在大气中大 0.3μm，故如气压有明显变化将造成测量误差。100mm 长的钢棒垂直放置时，由于自重而使材料产生压缩变形，长度约缩短 0.002μm。故在高空或海底测量的长度值将有误差。对运动物件有加速度时，将受力，将使尺寸测量有误差。

三、量具和量仪材料的选择

1. 根据材料热膨胀系数选择

当量具和量仪使用于恒温的计量室或要用于测量绝对长度时，应选择热膨胀系数尽量小的材料制作，这可使环境温度变化引起的尺寸误差最小。

当量具和量仪在加工车间使用时，由于车间经常是温度波动大，这时选用的量具和量仪材料其热膨胀系数应尽量和被测件的热膨胀系数接近，这时测量结果受环境温度变化的影响最小，测量误差最小。例如制造量块常用淬火轴承钢，其热膨胀系数和钢制工件接近。硬质合金、花岗岩和某些陶瓷虽硬度高、耐磨，但热膨胀系数和钢差别大，不宜用于制造量块。氧化锆陶瓷的热膨胀系数和钢接近，并且耐磨，现生产中已用于制造量块。

2. 根据材料的稳定性和耐磨性选择

过去量具常用淬火轴承钢 GCr15 制造，其硬度达 62～66HRC，有较高的硬度和耐磨性，但这种材料的淬火马氏体中有残余奥氏体，长期使用中因产生相变而使体积和尺寸变化，约为 0.02μm/(100mm·年)，尺寸稳定性差。

近年来很多量具改用氮化钢（如 38CrMoAl 等）制造，这种材料经表面氮化处理后表面硬度达 70HRC 以上，内部仍为原来的软的组织，不会产生相变，故不仅有很高的硬度和耐磨性，而且有很好的尺寸稳定性。氮化钢的热膨胀系数和其他钢相同，适宜制造量具在车间使用。

第二节　长度基准

一、米制长度基准

我国长度标准采用米制。

米制是 18 世纪法国最早提出的，当时把法国敦寇克港到西班牙巴塞罗那之间的子午线长度定为 10000000m。1875 年 5 月 20 日巴黎召开的国际米制会上确定米为国际长度基准，制成“国际米的原器”（用 90%的铂和 10%的铱制造，在 0℃ 测量），各国可复制“米原器”作为各国长度基准，但需定期复检。

由于复制的“米原器”复检困难，1960 年 10 月 14 日在巴黎通过用氪 Kr^{86}在真空中的波长作为长度基准：1m＝1650763.73×Kr^{86}的波长。

1983 年第 17 届国际计量大会上，通过新的更稳定更测量准确的国际长度基准：

$$1\text{m}=\text{光在真空中在}\frac{1}{299792458}\text{s 内行走的长度}$$

以上是国家的米制基准，省部级计量站的长度基准由国家计量局核准，再依次传递。

二、量块

一般的生产单位都以量块作为实用的长度基准。

我国的量块标准分为 00、0、1、2、3 和校准级 K 等 6 种精度等级，可根据测量精度选用适用的精度等级。

在几何量的精密测量中，为了使用上的需要常将各级精度的量块检定出其长度的实际值，使用时取检定所得量块实际长度，将检定量块长度实际值的测量极限误差作为误差处理。例如：标称长度为30mm的量块，经检定其实际长度为30.00012mm，测量极限误差±0.00015mm，使用时按30.00012mm计，其误差值为±0.00015mm。很显然这样使用量块，其测量精度高于原来等级的精度。但应注意，这量块不能认为已提高了一级精度，因量块有其他精度指标（如测量面的平面度误差，两测量面的平行度等）并未提高。使用量块时，需要将几块量块拼合成要求的尺寸。每两量块间的拼合面有油膜，将使长度增加6nm左右。为提高量块测量精度，应使用最少量块数拼合出要求的尺寸。

三、工厂自己专用的长度基准

一些精加工的工厂，使用量块作为长度基准不能满足测量精度要求，可以使用经国家检定的自己的长度基准。

美国穆尔公司（Moore Special Tool Co）是国际著名的精加工工厂，该厂建立自用的长度基准经验值得借鉴。该公司开始时使用矩形量块作为长度基准，但存在如下问题：1）两端测量面不平行；2）两端测量面和侧面不垂直，因而不能水平安放使用，如垂直放则由于自重造成长度缩短；3）测量面平面度不好。经多次返修，受结构限制达不到精度要求。1955年购进H形截面的精密线纹尺，但两端刻线间距离读数（用显微镜）的重复精度不高，约在0.5μm左右，很难提高。最后该厂采用圆柱端面规作为长度基准。外圆柱面可磨到很高圆柱度，水平放在V形支架内，可旋转以校验端面和外圆柱面的垂直度，容易达到两端面的高度平行。两端面间长度经测长和检测，重复精度很高。该圆柱形端面母基准规（16in，18in和480mm）先后经法国国际权度局（BIPM）、英国国家物理研究所（NPL）、美国国家标准局（NBS）等鉴定，一致认可精度达到0.1μm。

穆尔公司制成长度母基准规后又制成步距规。英制的步距规每一步距的增量为1in（全长18和16in），公制的步距规每一步距的增量为30mm（全长480mm）。全长步距的误差不超过0.05μm。使用步距规的优点是，可以避免使用量块时的量块拼合造成的积累误差。

第三节 测量平台

一、测量平台的选择

1．现在标准的平台有不同的精度等级

标准平台有00，0，1，2级。测量平台都采用00或0级，平台是多种测量的基准，直接影响测量精度。正确选用和保持平台表面处于良好状态，对获得精确的测量结果十分重要。

现在生产中使用的平台的测量表面多数为矩形，长宽比约为4∶3。用三块平台轮流相互刮研，达到完全接触，即认为已获得良好的平面。高精度的基准平台应采用正方形台面，平面度达到0.6μm。矩形平台三块对研，有可能产生一种扭曲面，相互间仍能相配；方形平台对研时转过90°即可避免这种扭曲。

2．平台的结构

过去平台都采用平板下加加强筋，有三个支承点架在底架上。这种结构刚度不很高，不能满足高精度测量要求。现在的测量平台多数都采用箱式结构，扁平的箱中有加强筋支承，这

种结构的刚性大大提高，因而保证了高精度的测量。

3. 测量平台的材料

测量平台有用铸铁制造，也有用花岗岩制造，这两种材料各有其优缺点。表5-2中有这两种材料测量平台的优缺点对比，可根据实际条件选用。

表5-2 铸铁和花岗岩测量平台的比较

特性	铸铁	花岗岩
耐磨性	良	优
稳定性	短期稳定性好，长期稳定性取决于稳定处理	受潮会变形，但长期稳定性好
刚性	优良	优良
可比强度下的相对重量	一定重量下具有高强度（容易在平板内铸加强筋	坚固，但在一定重量下要低些（采用加强筋是不现实的）
潮湿	生锈，但不歪扭	不生锈，但会受潮变形
制造和修复方法	研磨和刮削	研磨
接触点	能改变接触点（优点）	不容易改变接触点（使用中的缺点，亦会限制所能达到的精度）
毛刺	容易起毛（缺点）	形成洞眼（优点）
可采用的形状与尺寸	有限制，需要特木型浇铸	几乎不受限制，能锯或雕琢成形
使用时的适应性	优良——能加工、钻和攻丝	良好，但需要镶嵌和紧固
温度影响（吸热）	吸热快，散热慢（既是优点又是缺点）	吸热慢，散热慢（既是优点又是缺点）
温度影响（膨胀系数）	和大多数钢膨胀系数相同（通常是优点，但有时是缺点）	膨胀系数小，与钢不同（通常是优点，有时也是缺点）

二、测量平台的支承

大尺寸的平台重量较大（例如1200mm×1200mm的平台质量约为1150kg），如采用三点支承则支承点间距离大，平台将因自重而变形，再加上较重的被测件，平台变形将影响测量精度。

大型测量平台采用了图5-1所示的多点支承法。从图可看到平台由4个三爪支承架支起。每个三爪支承架上面支承在平台的三个加强筋交叉点上，下面中间有一支点可以浮动，使上面三个支承点受力均衡。有两个三爪支承架下面支点是支在固定的底坐架上。另两个三爪支承架下面是支在单支点的平衡杠杆的两端，故这两个三爪支承架上面的6个支承点都能浮动，受力均衡，全部受力集中在平衡杠杆下的一个支承点。因此这个大型的测量平台虽是由12个支承点受力，实际上仍是应用了三点支承一平面的原理，各支承点均能均衡受力。由于平台有12个支承点，支承点间距离大大减小，在测量较重的工件时，平台的受力变形仍较小，明显提高了测量精度。

三、测量平台本身的精度检验

测量平台（特别是铸铁平台）使用后，因磨损和变形会使精度下降。因此需要定期复检测量平台表面的平面度。

常用的平台检测是用三块平台轮流对研，找出凸起处进行刮研，直到接触斑点分布均匀。对高精度测量平台检测平面度可用电子水平仪、自准直光管或双频激光干涉仪，测出平台各处的水平倾角，经过数据处理，可以得到平台各处不平面度误差的具体数值。

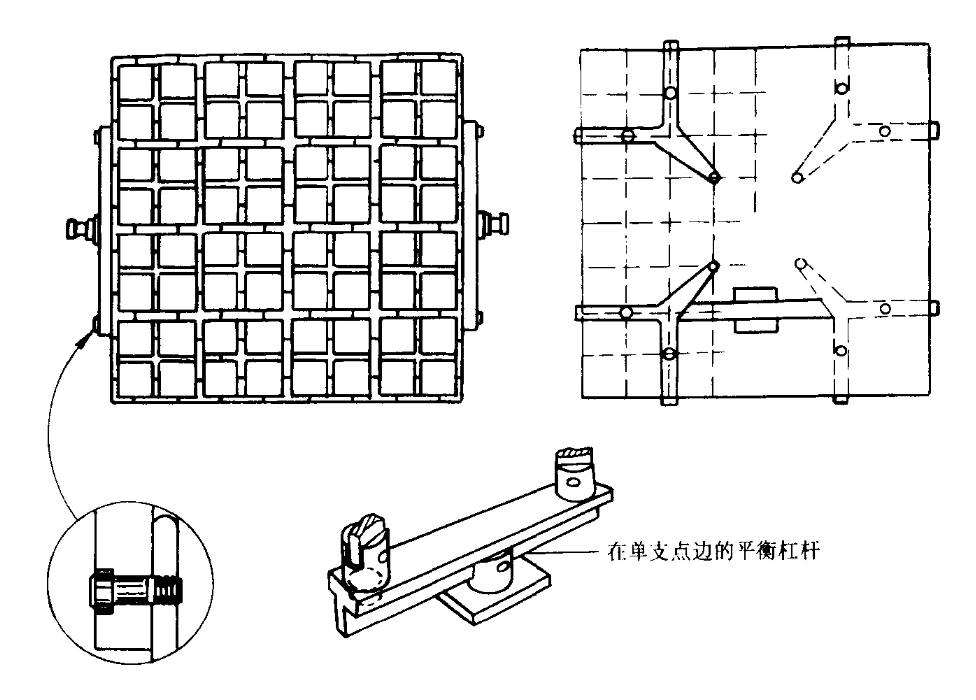


图 5-1 大型测量平台的自动平衡多点支承架

第四节 直线度、平面度和垂直度的测量

一、直线度的测量

1. 零件表面直线度的检测

在被检测长度较短时，可用刀口形直尺（或三棱、四棱平尺）检测。根据光隙大小测知表面的不直线度。这方法简单直观，检测精度可达 1～3μm，但检测精度和检验员的经验有关。

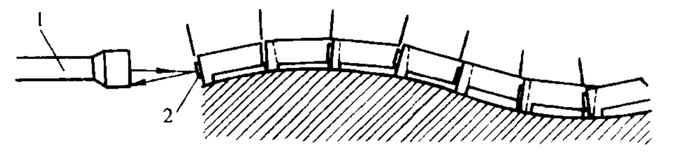


图 5-2 用自准直光管或激光检测表面直线度
1—自准直光管或激光头 2—反射镜

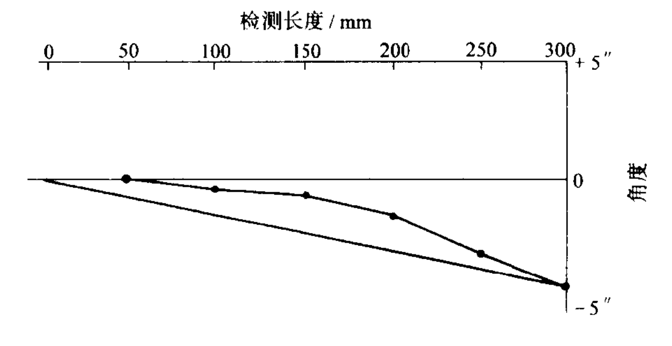


图 5-3 不直线度测量结果示意图

当检测长度较长时，可采用分段检测其水平倾角，经数据处理而得到表面的不直线度。精确检测表面倾角可用电子水平仪，自准直光管或激光小角度检测仪。图 5-2 中是用自准直光管或激光检测直线度的原理。从图可看到自准直光管或激光头固定安放，反射镜或激光小角度测量反射镜放在被检测表面，测出倾角后，将反射镜移一定距离再测，这样测得不同位置的倾角。将不同位置测得的倾角叠加，如图 5-3 所示，该表面测量方向的不直线度即可用作图法或计算法求出。用电子水平仪检测时，即可用电子水平仪代替反射镜，测量方法同前。

用这方面测量时，应注意反射镜每次移动距离应小于反射镜座的长度，否则有可能产生

图 5-4 的情况，不能测出正确的结果。如反射镜座较短时，可将反射镜放在一定长度的桥板上，检测时移动桥板即可。

2. 直线运动的直线度检测

机床导轨等经常需要检测其运动的直线度。最简单的检测方法是在溜板（运动导轨）上安放高精度平尺，用测微仪检测其直线运动的不直线度误差，如图 5-5 所示。

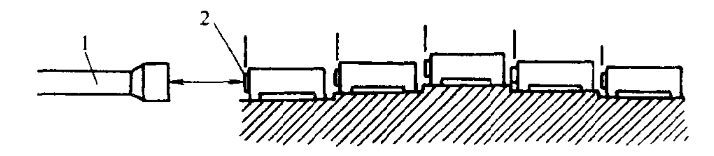


图 5-4 反射镜每次移动距离过大时造成测量误差
1—自准直光管或激光头 2—反射镜

在直线运动的精度很高时，用上述方法测得的不直线度误差实际上包含运动的不直线度误差和平尺本身的不直线度误差，而后者的误差比例已不能忽略。为提高测量精度，可用上法先检测一次，然后将平尺在原位翻转（例如原来测量面向左，翻转后测量面向右）再测一次，两次测量结果同位置相加，则平尺本身的误差正负相消，余下的误差即为直线运动的不直线度误差。

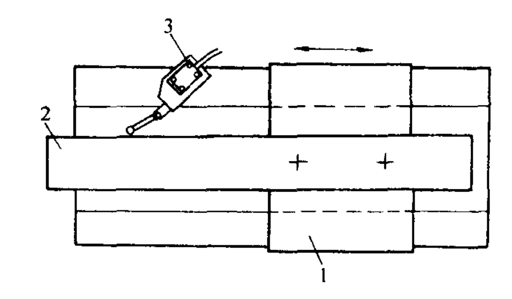


图 5-5 直线运动的直线度检测
1—溜板（运动导轨） 2—高精度平尺
3—测微仪

直线运动的不直线度误差现在可以用激光测量。可将激光小角度测量反射镜放在运动导轨上，用激光即可测出这直线运动不同位置的运动倾角，数据处理后即得到这直线运动的不直线度误差。这方法便于实现检测自动化，现在的激光测量仪配备有相应的数据处理软件，检测后在计算机屏幕上可直接显示运动不直线度误差曲线，并可打印出具体数值。现国外不少机床厂规定机床的出厂精度检验都使用激光测量。

二、平面度测量

平面度测量常遇到的有两种情况：①小面积高精度的平面度测量，常用光学平晶观察其干涉条纹形状而测出其平面度误差，这测量方法见图 5-6；②面积较大时，平面度检测可将被测表面划定不同方向的直线若干条，检测其直线度，综合后即得到该表面的平面度误差。

图 5-7a 所示为用激光测量表面的平面度情况。可看到在测不同方向不同位置的直线度时，激光头不需移动，只需转动或增加反射镜可改变激光的光路位置。综合直线度误差的测量结果，即可得到平面度误差，图 5-7b 为检测平台最后得到的平面度误差图形。现激光测量仪有数据处理软件，检测后可以直接在计算机屏幕上显示和图 5-7b 类似的图形，并可打印各点的误差值。用自准直光管或电子水平仪检测平面度，方法基本相同。

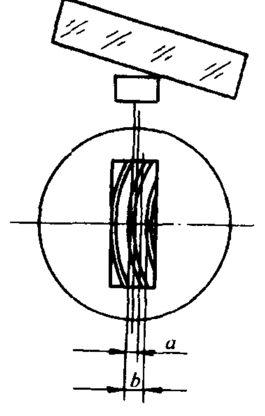


图 5-6 用光学平晶检测平面度

三、垂直度检测

零件中垂直度的检测，经常在测量平台上用 90°角尺检测。90°角尺本身的垂直度要求很高。常用的 90°角尺有 L 形、T 形和圆柱形。其中圆柱形 90°角尺容易制成很高精度，常用作基准 90°角尺。这种圆柱形 90°角尺先将外圆磨成精密圆柱形（没有锥度），然后放在 V 形块内转动，检测并研磨端面，使端面和外圆高度垂直，垂直放在测量平台上即可使用。

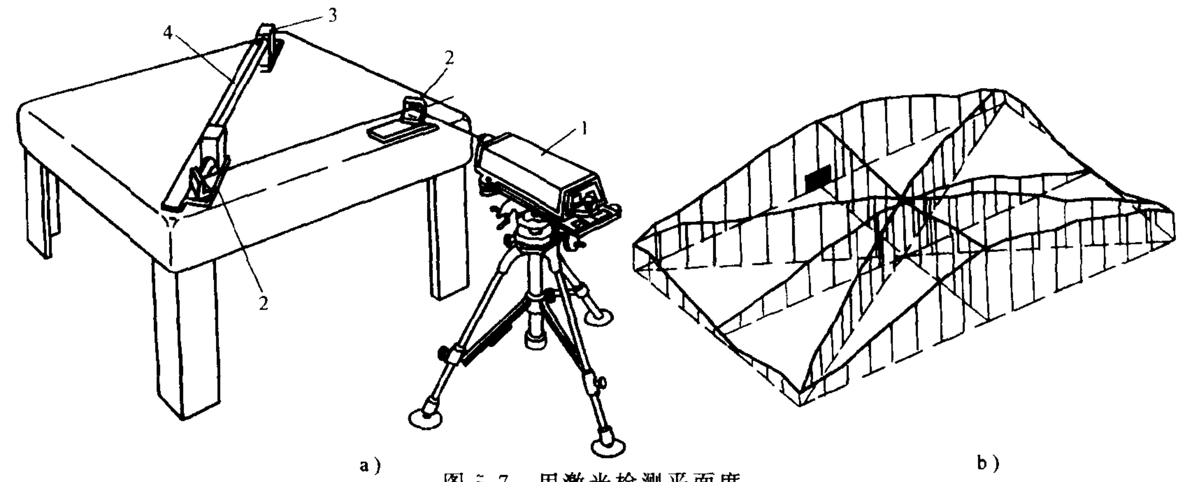


图 5-7　用激光检测平面度
a）用激光检测平面度示意图　b）平面度检测结果图形
1—激光头　2—反射镜　3—激光小角度测量反射镜　4—直尺

L 形和 T 形 90°角尺，很难用同样的 90°角尺互检制成准确的 90°角，而必需用高精度的基准 90°角尺来检测它。但是用圆柱形 90°角尺和 L 形 90°角尺的互检很容易将角度误差测出。图 5-8 是检测情况，在第一位置圆柱 90°角尺和 L 形 90°角尺的顶端有光隙 δ_1，将 L 形 90°角尺翻转（第二位置），如光隙仍在顶端且 $\delta_1=\delta_2$，则说明圆柱 90°角尺角度准确，误差全在 L 形 90°角尺。因光隙在顶端，L 形 90°角尺的角度小于 90°。如果在第二检测位置，光隙变到 90°角尺根部且$\delta_1=\delta_2$，则角度误差全在圆柱 90°角尺。如果 $\delta_1\neq\delta_2$，则圆柱 90°角尺和 L 形 90°角尺的角度都有误差。测出误差后，即可进行研修，提高 90°角尺精度。

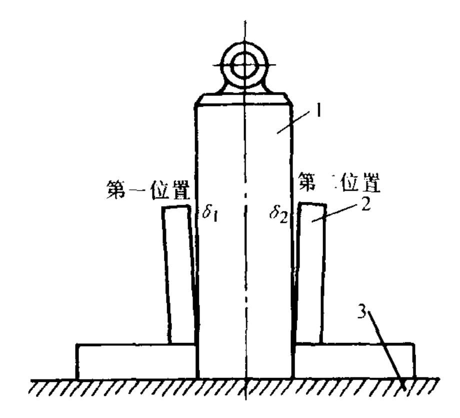
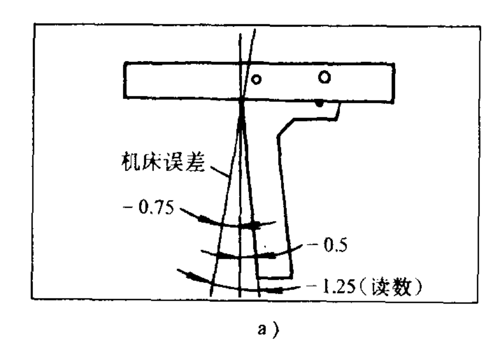


图 5-8　圆柱 90°角尺和 L 形 90°角尺的互检
1—圆柱 90°角尺　2—L 形 90°角尺
3—测量平台

由于 L 形和 T 形 90°角尺不易制成很高精度，实际使用时在某些情况下可采用 90°角尺翻转法，提高测量精度。图 5-9 所示为用 T 形 90°角尺测十字溜板垂直度时的情况。如图所示，90°角尺第一位置测得导轨的不垂直误差−1.25μm，90°角尺翻转后的不垂直误差+0.25μm。去掉 90°角尺误差后的不垂直误差为 $\Delta=\frac{1}{2}[-1.25-(+0.25)]=-0.75\mu m$，根据 90°角尺长度可算出十字溜板的不垂直误差的角度值。从上面的检测结果亦可得知 90°角尺的误差为−0.5μm。



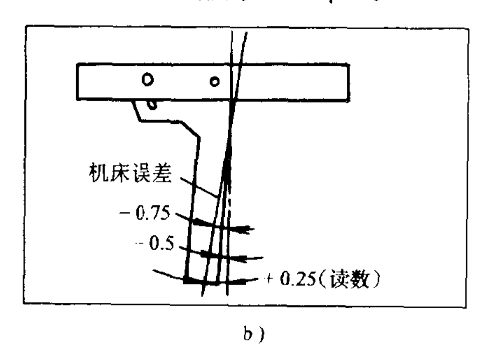


图 5-9　用 90°角尺翻转法提高测垂直度时的精度
a）90°角尺第一次位置　b）90°角尺翻转后

第五节　角度和圆分度的测量

一、角度基准

现用的角度标准是将圆周分为360°，每度分为60′，每分分为60″。有时为避免和时间的分、秒混淆，亦称为角分、角秒。采用60进制使用不方便，故有时直接用小数点值而不化成分与秒。角度亦可用弧度表示。

精密测量中的角度基准有：1）角度块规，可用数块角度块规贴合成要求的角度。角度块规现在使用不多，原因是组合后有累积误差，且角度块规本身的角度检测要用其他的原始基准；2）多面体，在配合自准直光管使用后，精度高，现在被承认可作角度基准；3）多齿分度盘，现在的精密1440齿分度盘精度可以达到0.05″～0.1″，读数的重复精度0.02″，每转1齿增量为$\frac{1}{4}$°，配合自准直光管用作角度基准，使用方便并且可靠。

二、正弦工作台

正弦工作台在角度测量中用得较多，因它使用方便，有一定的测角精度。正弦工作台的工作原理见图5-10，其中L为已知，检测时使用的量块高度为H，则α角可用下式计算

$$\sin\alpha = \frac{H}{L}$$

正弦工作台测角不易获得很高精度，原因：1）两圆柱中心距L的偏差、两圆柱的圆柱度误差、两圆柱轴线的不平行、量块尺寸H的偏差、测量平台的平面度误差等都很难减到很小；2）当α角达到45°后测量误差已很大，α角再加大，测量误差将急剧加大。

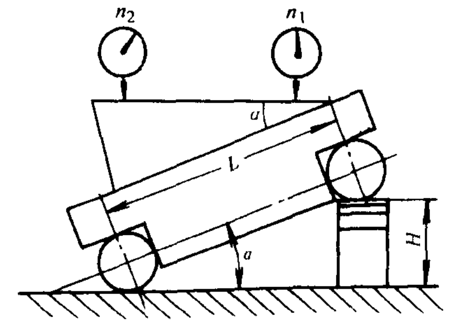


图5-10　正弦工作台工作原理

三、精密测量转台

精密测量转台在角度测量中用得很普遍，根据需要可以制成水平轴或垂直轴结构。根据使用的测角方法，精密测量转台有下列几种

1）精密蜗轮副再加凸轮误差补偿的机械式转台（图5-11a）；

2）有圆刻度尺和显微镜读数的光学转台（图5-11b）；

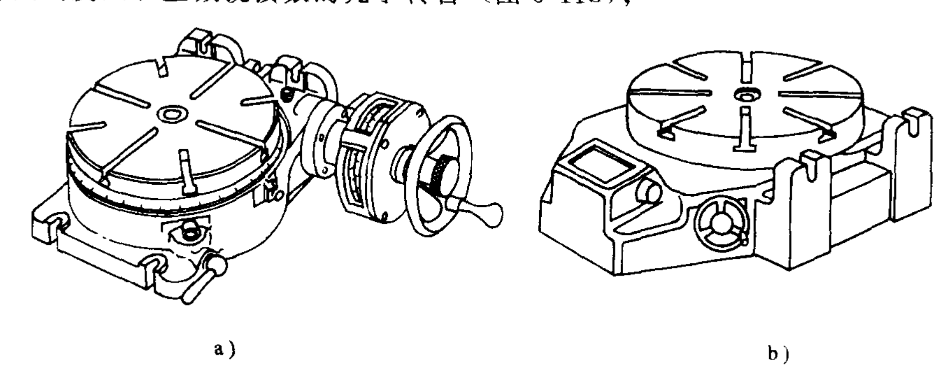


图5-11　精密测量转台

a）机械式转台　b）光学或光电式转台

3）使用圆光栅的转台；

4）使用圆感应同步器的转台。

使用精密蜗轮副的高精度转台由于制造难度很大，现在已逐步被其他几种转台代替。圆刻度尺的光学转台，由于需要另加角度细分读数，现在已用得不多。使用圆光栅和圆感应同步器的精密测量转台（外形见图 5-11b）由于测角精度高（分辨率 0.1″，测角精度 0.3″～0.5″），读数数字显示，易于实现自动化测量，故现在已是精密测量转台的主要品种。

使用圆光栅和圆感应同步器的转台，旋转驱动机构和角度测量系统是分离的，因此测量系统不存在磨损问题。要使转台获得高精度，除圆光栅和圆感应同步器本身的制造精度要求甚高外，还要求转台的回转轴有极高的回转精度。现转台的轴承常采用精密滚针轴承，密珠轴承等，装配时有小量的过盈预载。装配时圆光栅和圆感应同步器应尽量和旋转轴同心，否则将造成较大的测角误差，例如主轴轴线偏 1.2μm 时，在 200mm 直径处将产生 2.58″角度误差。

四、精密多齿分度盘

1. 精密多齿分度盘的工作原理和结构

精密多齿分度盘是一种机械式圆分度器，它具有自动定心，重复性好，无角位称空程，操作简便，使用寿命长等特点。特别是其分度精度甚高（可达 0.05″～0.1″），较其他精密测量转台的精度提高了一个数量级。美国穆尔公司（Moore Special Tool Co.）生产的 1440 齿分度盘，因精度高、质量可靠，常被用作角度基准。

多齿分度盘的结构是由两个直径、齿数和齿形都相同的上、下端面齿盘组成，如图 5-12 所示。多齿分度盘的齿数常用的有 360、720、1440 几种，它们的分齿增量分别是 1°、$\frac{1}{2}$°、$\frac{1}{4}$°。多齿分度盘具有很高的分度精度，不仅是由于上、下齿盘经精加工成对研合后，所有齿的齿距误差都很小，而且在工作时上、下齿盘在一定的轴向力下强迫啮合，所有齿产生一定变形后都和对应的齿良好接触，因此全部齿都接触，产生齿距误差的抵消均化作用，由于圆周封闭的特点，使偏差总和接近于零。多齿分度盘工作时，下齿盘固定不动，上齿盘靠机械、液压作用抬起，与下齿盘脱离接触，旋转需要的角度后降下与下齿盘啮合，根据转过的齿数多少达到精确分度的要求。

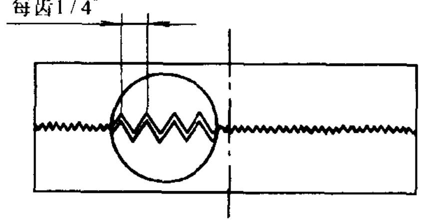


图 5-12　1440 齿精密多齿分度盘

2. 精密多齿分度盘的小角度分度器

精密多齿分度盘的明显局限性是，即使是齿数最多的 1440 齿分度盘也只能测量$\frac{1}{4}$°倍数的角度，而不能测尾数小于$\frac{1}{4}$°的角度。附加小角度分度器的 1440 齿分度盘，解决了带小尾数的角度测量问题。

小角度分度器是和 1440 齿分度盘制成同轴的，并和下齿盘连成一体。小角度分度器可使 1440 齿分度盘的下齿盘旋转，最大旋转量为$\frac{1}{4}$°，旋转角的分辨率为 0.1″，配合 1440 齿分度盘的读数，可以测量 0～360°内分辨率为 0.1″的任意角度。

小角度分度器的结构原理见图 5-13。它采用每毫米大约 5 牙的精密千分丝杠来获得移动的高放大倍数（约为 1400∶1）。这千分丝杠采用双螺母使间隙小于 0.2″。千分丝杠是和下齿

盘相连的，其端面用恒压弹簧顶紧在固连于底座的硬质合金小轮上。硬质合金轮和主轴中心距约为 145.3mm（可调），以保证千分丝杠转 3 转时下齿盘旋转$\frac{1}{4}°$（15′）。千分丝杠靠直径 100mm 刻度盘的手轮转动，刻度盘上加游标使读数的分辨率达到 0.1″。

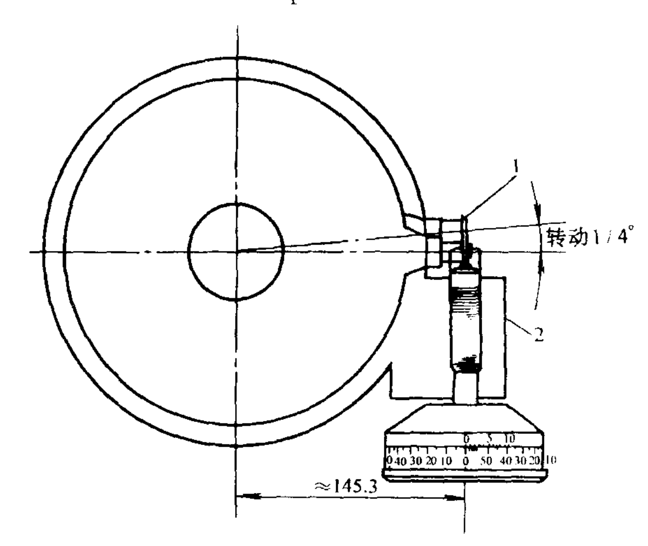


图 5-13 小角度分度器结构原理

1—固连在底座上的硬质合金轮 2—装在下齿盘上的小角度分度器组件

小角度分度器的千分丝杠走的是直线，而硬质合金轮的相对运动轨迹是圆弧，理论上将造成一定的非线性。平时调整好的位置是中点，故转动角度为$\pm\frac{1}{8}°$，旋转半径较大（145.3mm），故这误差甚小，可忽略不计。

穆尔公司生产的小角度分度器装在 1440 齿分度盘后，1440 齿分度盘的分齿精度仍保持不变(0.1″)，小角度分度的实际精度约为 0.3″，读数分辨率为 0.1″。

3. 多齿分度盘的标定

（1）使用精度更高的测角仪器对多齿分度盘进行标定 美国穆尔公司有经国家鉴定的特高精度基准多齿分度盘，可以用来对其产品的多齿分度盘进行标定。对于有小角度分度器的 1440 齿分度盘则需用质数齿的基准多齿分度盘（其角增量不是整数）来对它进行标定。此外还可用其他高精度测角仪器对多齿分度盘进行标定。这些方法虽好但对多数单位无条件使用。

（2）利用圆周 360°封闭的原理，用两个多齿分度盘互检标定 用两多齿分度盘互检时，将两多齿分度盘叠放（两轴线尽量重合），顶上放自准直光管的反射镜，将自准直光管对准调零，如图 5-14a 所示。将多齿分度盘 2 转过 A 角（A 角名义值应是 360°能等分的，如 90°，60°等），再将多齿分度盘 1 逆转名义值相同的 X 角，如图 5-14b 所示，这时用自准直光管记录下误差值（误差为 X-A）；再将分度盘 2 转同样名义值的 B 角，分度盘 1 仍逆转 X 角，再记录下误差值；这样继续检测直到多齿分度盘 2 已转完 360°。现举例以具体数值说明数据处理方法。

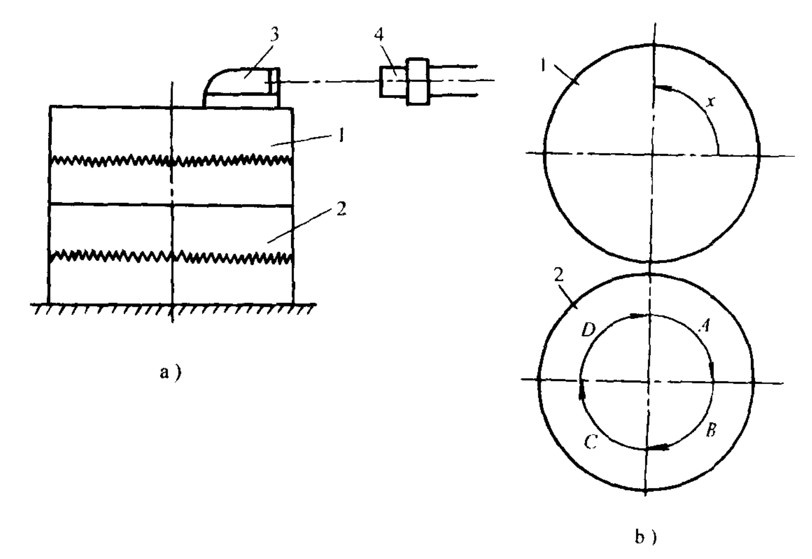


图 5-14 两个多齿分度盘互检标定原理

1—多齿分度盘 1 2—多齿分度盘 2 3—反射镜 4—自准直光管

例如检测时名义转角为 90°，检测结果误差值如下：

$X-A=+15'$

$X-B=-10'$

$X-C=+5'$

$X-D=+22'$

将四组数据相加　$4X-(A+B+C+D)=32'$

因　　　　$A+B+C+D=360°$　故可算出 $X=90°8'$

同时可算出　　$A=89°53'$，$B=90°18'$，$C=90°3'$，$D=89°46'$

经过不同位置的多次互检，可以标定出这两个多齿分度盘的误差值。

第六节　圆度和回转精度的测量

一、圆度的测量方法和圆度误差的评定

1. 圆度的测量方法

由于各种精密机械、精密仪器的轴系有很高的旋转精度要求，这类轴系的高精度轴和孔，不但有严格的尺寸公差要求，而且有很高的形状公差要求。控制圆度误差是保证形状公差的核心内容，因此圆度测量是精加工中的关键技术。

现在机械制造业中测量圆度的方法有：

1）直径法，测不同方向的直径，对具有奇数棱的零件不能适用；

2）圆周界限量规，用塞规和环规测量，主要是保证尺寸公差，对圆度误差有一定的限制作用，但不能测出圆度误差；

3）在顶尖上旋转法，测量精度受到顶尖和顶尖孔精度的影响；

4）V 形块法，零件放在 V 形块内，零件相对于测头转动测量；

5）三点测头法，测点相隔 120°进行测量；

6）圆度仪法，使用高精度回转轴和测头，相对运动形成一个理想圆和工件外形比较，测出其圆度误差；

7）三点法（或两点法）在线测量，进行误差分离，测出工件的圆度误差。

上述①到⑤的测量方法，只适用于精度不高时的测量；高精度轴和孔的圆度，现在主要用圆度仪测量，可测出圆度误差的具体数值。

2. 圆度误差的定义和图形表示

1）定义圆度是一个复杂问题，世界上提出了种种定义，我国形位公差标准采用“公差带概念”确定圆度的定义。圆度误差指包容同一正截面实际轮廓且半径差最小的两同心圆间的距离，例如这两圆的半径差 Δr，圆度公差带即指这两同心圆间区域。

2）根据圆度误差的特性，可以将被测的外圆轮廓以富氏级数表示。在极坐标中，任一 θ 角位置的向量半径 $\rho(\theta)$ 为

$$\rho(\theta)=r_0+\sum_{i=1}^{\infty}C_i\sin(i\theta+\alpha_i)$$

式中　C_i 为富氏系数，α_i 为初始位置。

可看到 r_0 是常数项，是相对于坐标原点的半径为 r_0 的平均圆。级数中第二项 $C_1\sin(\theta+\alpha_i)$ 为一次谐波，反映了安装偏心的影响，$C_2\sin(2\theta+\alpha_i)$ 为二次谐波，反映了椭圆度误差。如果去

掉常数项 r_0 和反映偏心的一次谐波以及反映表面粗糙度的高次谐波分量，轮廓曲线反映的圆度误差 $\Delta r(\theta)$ 为

$$\Delta r(\theta) = \sum_{i=2}^{n} C_i \sin(i\theta + \alpha_i)$$

当圆度误差的二次谐波最大时，零件实际轮廓呈椭圆形；如三次谐波最大时，零件显出三边棱圆形。

3）用圆度仪测出的圆度误差，采用极坐标记录出圆度偏差曲线，如图 5-15 所示。这圆度偏差曲线只表示被测件轮廓在给定的放大倍数下的相应相位的偏差，不表示圆的直径。同样的圆度偏差，在放大倍数不同时画出的圆度偏差曲线图，形状就有很大不同，放大倍数愈大时，曲线图就越呈星形，如图 5-15 所示。

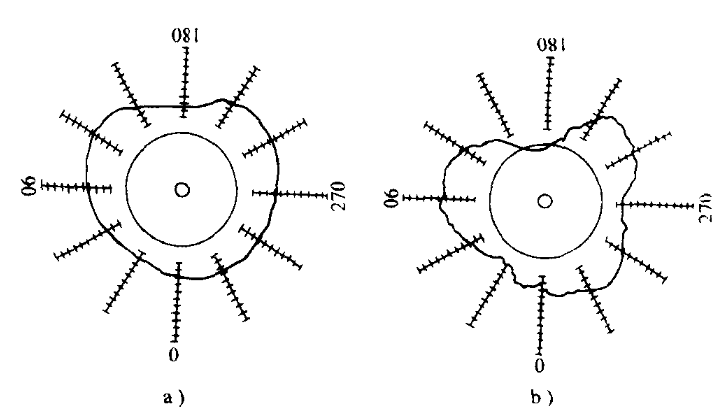
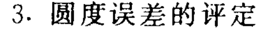


图 5-15　圆度仪记录的圆度偏差曲线
a）放大倍数较小时　b）放大倍数较大时



3. 圆度误差的评定

圆度误差有不同的评定方法。同一检测所记录下来的圆度偏差曲线，用不同的评定方法得到的圆度误差值不同，有时差值达到 10%～20%。圆度误差现有 4 种评定方法：

1）最小外接圆法　先求出包容实际轮廓曲线且半径为最小的外接圆，然后再画出和它同心且半径最大内接圆，这两圆的半径差即为圆度误差，见图 5-16a。这种评定方法适用于轴类，因为它工作时起作用的是外接圆。

2）最大内接圆法　先求出内切于实际轮廓且半径为最大的内接圆，然后再画出和它同心且半径最小的外接圆，两圆的半径差即为圆度误差，见图 5-16b。这种评定方法适用于孔类，因它工作时起作用的是内接圆。

3）最小包容区域圆法　这方法也称最小半径差法，它是以包容实际轮廓且半径差为最小的两个同心圆的半径差为圆度误差，见图 5-16c。这种评定方法得到的圆度误差要比第 1 和第 2 方法得出的小，因此零件最容易合格，但这方法使用电算比较麻烦。

4）最小二乘方圆法　它是以最小二乘方法求得轮廓图形的中线—平均圆作为基础圆，再作同心的轮廓外切圆和内切圆，这外切和内切圆的半径差即是圆度误差，见图 5-16d。用这方法得到的圆度误差值要比第 1 和第 2 种方法求得的小，但比最小包容区域圆法求得的稍大。这种方法求得的平均圆及圆度误差能反映被测轮廓的综合情况，且容易实现电算，因此从理论上看是一种比较合理的方法。

二、圆度仪及其测量精度分析

1. 圆度仪的工作原理及类型

从几何角度看，如果一个动点绕一个定点运动，且距定点的距离不变，则动点的运动轨迹为一圆。依照这原理，用一个精密回转轴系上的一个点（测微装置测头）所产生的标准圆与被测轮廓作比较，就可求得圆度误差。这种具有精密轴系测量圆度误差的仪器即是圆度仪。

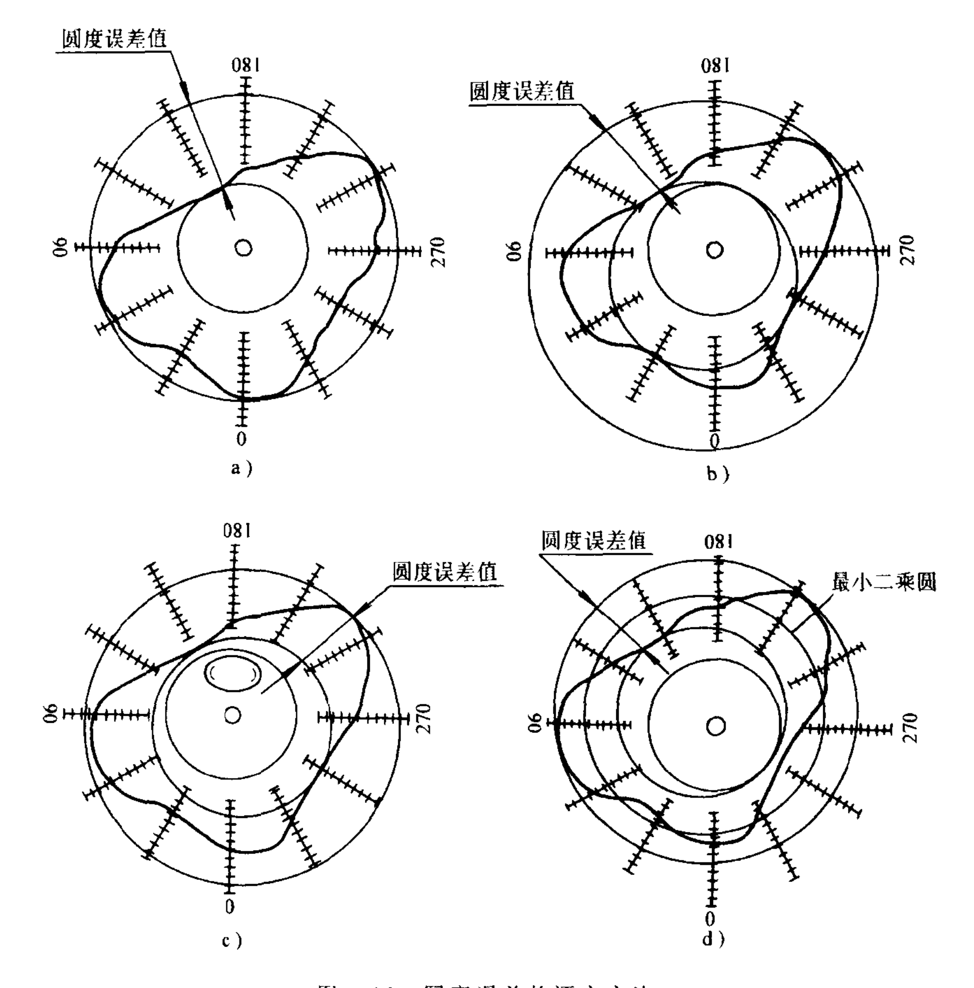


图 5-16　圆度误差的评定方法

a）最小外接圆法　b）最大内接圆法　c）最小包容区域圆法　d）最小二乘方圆法

圆度仪有两种结构型式，一种是测量头随主轴（以下简称测量轴）旋转，被测件固定在工作台面上不动，如图 5-17 所示。在固定工作台上有调心工作台以便调整工件对测量轴的偏心和倾斜度。由于被测件装在固定工作台上，检测重量大和有偏心重量的零件时，不会影响测量轴的精度，也不会造成测量轴的磨损或损坏。这类型的圆度仪可以制成较高精度。英国 Taylor Hobson 公司的 TALYROND3、TALYROND73 型和我国上海机床厂 HYQ-014A、中原量仪厂 DQR-1 型圆度仪都是属于这种结构。测量轴旋转式圆度仪测圆度时效果很好；但受结构限制，测量中要使测量头或工件作垂直或水平运动很困难，因此不易用于测量圆柱度、同轴度、平面度和垂直度。

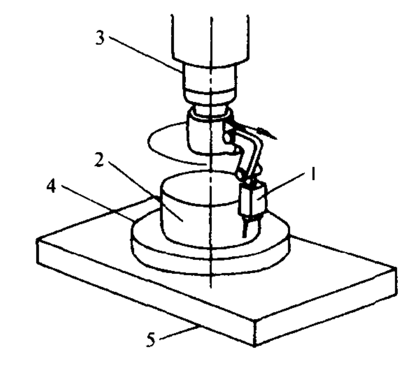


图 5-17　测量头随主轴旋转式圆度仪

1—测量头　2—被测件　3—测量主轴　4—调心工作台　5—固定工件台

圆度仪的另一种结构型式是测量头固定不动，被测件随旋转工作台转动而进行测量，如图 5-18 所示。在旋转工作台上都装有调心工作台，以便调整工件对旋转工作台的偏心和倾斜度。新的圆度仪的调心工作台能自动调整，到零件偏心量小于 1μm。旋转工作台式圆度仪可以测圆度、同轴度和端面跳动量。旋转工作台的主要缺点是，工件重量大或是有偏心重量时会影响工作台的回转精度。近年来由于设计和制造水平的提高，

液体静压和空气静压轴承的旋转工作台，不仅有极高的回转精度，同时又有很大的承载能力和很大的角刚度，已逐渐解决了装工件而影响工作台回转精度的问题。最新型的旋转工作台式圆度仪都加上了平行于工作台轴线的高精度垂直导轨，和垂直于工作台轴线的高精度水平导轨，使测量头在测量过程中能作精确的垂直或水平运动（见图 5-18)。这种新型圆度仪的测量功能就大大的扩大了，不仅可测圆度，而且可测圆柱度、同轴度、端面的平面度、端面和轴线的垂直度，轴线直线度等。由于旋转工作台式圆度仪的这些优点，现在应用日广。TAYLOR HOBSON 公司的 TALYCENTA、TALYROND300 型和我国机床研究所的 JCS-042 型圆度仪都属于这种结构形式。

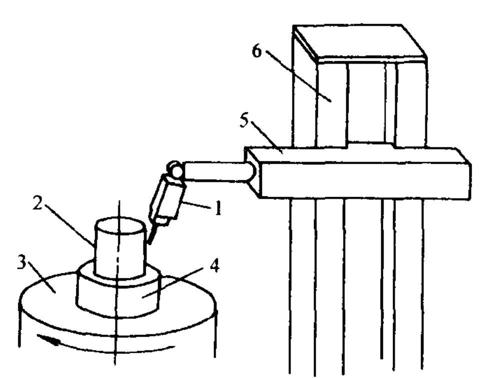


图 5-18 旋转工作台式圆度仪
1—测量头 2—被测件 3—旋转工作台
4—调心工作台 5—水平导轨
6—垂直导轨

现在的圆度仪都有和圆度测量同步转动的纪录器，采用极坐标画出封闭的圆度偏差曲线；同时有计算机采集和处理测得的数据，可以将最后结果数据打印出来。

2. 影响圆度仪测量精度因素的分析

1) 主轴回转误差 圆度仪测量法的基础是高精度的主轴（测量轴或旋转工作台轴），主轴回转误差将直接反映为圆度测量误差。故主轴的回转精度就代表了圆度仪的精度和圆度仪的水平。现在圆度仪的主轴回转精度一般为 0.05μm，部分高精度圆度仪的主轴回转精度为 0.025μm。

2) 工件轴线和主轴轴线偏心引起的误差 工件安装偏心 e 在误差数字记录中将是偏心量的一次谐波项，误差 Δ_1 为

$$\Delta_1 \approx \frac{e^2 \sin\varphi}{2R}$$

式中 φ——被测点的相位角；

R——工件平均半径。

在记录图中因误差放大 K 倍，不同相位角时误差值不同，将造成图形畸变。

为消除偏心造成误差，测量时调整工件，尽量减小偏心量，在数据处理时消去反映偏心的一次谐波项。

3) 工件轴线对主轴轴线倾斜引起的误差 当工件为圆柱表面有倾斜角 θ 时，在被测截面中为椭圆形，引起的圆度误差 Δ_2 值在数字记录中将是二次谐波项，Δ_2 值为

$$\Delta_2 \approx \frac{1}{2} R\theta^2$$

上式中未考虑测量头形状产生的额外误差。

要提高圆度测量的精度，应减小工件轴线的倾斜。

4) 测量头形状和测头半径变化引起的误差 圆度仪使用的测量头端部形状有针形，球形，斧形和圆柱形。

针形测头测量误差最小，测量结果中还包含表面粗糙度，其缺点是容易将工件表面划伤。球形测头可选用适当的半径，测量时可消除表面粗糙度的影响，并减少工件表面划伤。在工件硬度低和要消除螺旋形刀痕影响时，可选用斧形或圆柱形测头，还可避免工件划伤和消除

表面粗糙度影响；但这时将使工件轴线倾斜造成的误差 Δ_2 值加大。

要消除测量中表面粗糙度的影响，还可使用电子滤波法，采用低通挡（1～45 波/周），排除表面粗糙度反映的高频波的影响。

5）测量力的影响　测量力的选择原则是要保证测头和工件表面接触稳定，同时不致划伤（产生塑性变形）被测表面。测量力一般在 0.005～0.2N；工件材料软，测量头曲率半径小时测量力取小值，材料硬（硬度≥20HRC）和测量头曲率半径大时测量力取大值。

6）测量头偏位引起的误差　测量头如不对准工件中心将产生测量误差。如测头的偏位角在 10°内，测量误差在 2%以内。测小件时应特别注意测头的对中，否则很可能造成较大的测量误差。

三、圆度的在线测量

近年来发展了圆度在线测量方法，零件不必从机床上取下就可在线测量其圆度，这方法还解决了无大型圆度仪无法测量大零件圆度的困难。

这测量方法的原理是：零件卡在机床上转动，用三个测微仪在同一平面和一定的相位角处测零件的径向跳动，这径向跳动包含零件的圆度误差和机床主轴的回转误差，基于三点法误差分离原理而获得零件的圆度误差。这测量方法在后面机床主轴回转精度测量时还要讲述。

这种圆度的在线测量方法有较多优点，应扩大其生产应用。

四、主轴回转精度的测量

1. 用高精度钢球测主轴的回转精度

制造和使用精密机床和精密仪器，主轴回转精度的测量都是极为重要的。

回转精度在 0.5～1μm 以下的精密主轴，可以使用高精度标准钢球（圆度在 0.05～0.1μm）来检测其回转精度。将高精度钢球卡在主轴的端部，尽量调整使其同心，然后用测微仪测出其径向跳动，如图 5-19 所示。测出的径向跳动包含机床主轴的回转误差和钢球的圆度误差。由于钢球圆度误差比主轴回转误差小得多，可以忽略不计，故测出的径向跳动值，就是机床的回转误差。

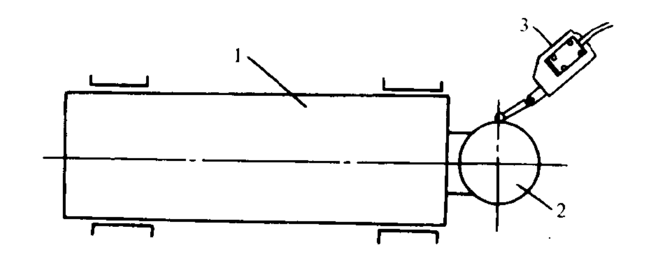


图 5-19　用高精度钢球测主轴回转误差
1—主轴　2—高精度钢球　3—测微仪

2. 用三点法误差分离原理测精密主轴的回转误差

主轴回转精度达到 0.1μm 左右时，主轴回转误差和钢球圆度误差已是同一个数量级，前面的钢球测主轴回转误差法已不能使用。这种高精度主轴的回转误差可用三点法误差分离原理来测量。三点法一般以离散采样方式，通过误差分离计算，同时得到工件圆度误差和主轴的回转误差。

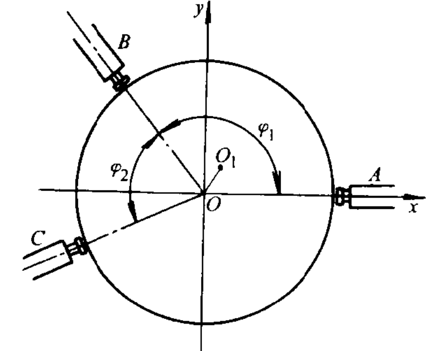


图 5-20　三点法测主轴回转误差的原理

三点法测试原理如图 5-20 所示。A、B、C 三个测微仪安置在同一测量平面内，其夹角为 φ_1 和 φ_2，三个传感器的轴线交于 O 点，以 O 为原点，A 测微仪轴线为 x 轴，建立直角坐标系 xOy，x 轴为加工的敏感方向。$S(\theta)$ 为被测工件的轮廓形状误差。O_1 为主轴回转中心则 O_1 的坐标为 $X(\theta)$ 和 $Y(\theta)$。测微仪 A、B、C 的输出信号分别为 $A(\theta)$、$B(\theta)$ 和 $C(\theta)$，则

可得如下关系

$$\left.\begin{aligned}A(\theta) &= S(\theta) + x(\theta) \\ B(\theta) &= S(\theta + \varphi_1) + x(\theta)\cos\varphi_1 + y(\theta)\sin\varphi_2 \\ C(\theta) &= S(\theta + \varphi_1 + \varphi_2) + x(\theta)\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + y(\theta)\sin(\varphi_1 + \varphi_2)\end{aligned}\right\} \tag{5-1}$$

将式(5-1)中的 $x(\theta)$、$y(\theta)$消去，即得到三点法误差分离基本方程

$$A(\theta) + C_2B(\theta) + C_3C(\theta) = S(\theta) + C_2S(\theta + \varphi_1) + C_3S(\theta + \varphi_1 + \varphi_2) \tag{5-2}$$

式中 $C_2 = -\sin(\varphi_1 + \varphi_2)/\sin\varphi_2$

$C_3 = \cos\varphi_1/\sin\varphi_2$

令 $D(\theta) = A(\theta) + C_2B(\theta) + C_3C(\theta)$为组合信号，代入式(5-2)得

$$D(\theta) = S(\theta) + C_2S(\theta + \varphi_1) + C_3S(\theta + \varphi_1 + \varphi_2) \tag{5-3}$$

令 n 为工件转 1 周检测读数点数，$\theta = \frac{2\pi}{n}k$，$\varphi_1 = \frac{2\pi}{n}m_1$，$\varphi_2 = \frac{2\pi}{n}m_2$，将式(5-3)离散化得

$$D(k) = S(k) + C_2S(k + m_1) + C_3S(k + m_1 + m_2)$$

由于 $S(k)$、$D(k)$是周期序列，故对两边进行离散富立叶变换，并利用离散富立叶变换的时延—相移特性求得 $S(k)$。

将 $S(k)$代入式(5-1)，即可分别求得任意时刻主轴回转运动误差的 x、y 向分量

$$x(k) = A(k) - S(k)$$

$$y(k) = \frac{CB(k) - S(k + m_1) - x(k)\cos\frac{2\pi}{n}m_1}{\sin\frac{2\pi}{n}m_1}$$

同理亦可求出工件廓形的圆度误差。

三点法测量中正确选择 φ_1和 φ_2角对测量结果有一定影响。由于这方法计算比较复杂，常采用一定的计算简化，应注意不要因简化计算而使计算结果失真。

第七节 激光测量

一、激光测量的基本原理

1. 激光测量的应用范围

激光测量在机械制造中应用日广，它可以有很多不同的用途，不仅可以测量长度、小角度、直线度、平面度、垂直度等，而且可以测量速度，位移、振动，表面微观形貌等。激光测量可以用于动态测量，在线测量，很容易实现测量的自动化。此外激光测量还适用于大尺寸的测量。

激光测量可以达到很高的测量精度，常用的双频激光测量系统测长度时分辨率达到 0.01μm，采用空气参数补偿后测量精度达 0.1μm 以上。采用特殊稳频的高精度激光测量系统，测长度分辨率达 0.7μm，测量精度 2nm。

2. 单频激光测量原理

图 5-21 为单频激光干涉测量系统，氦氖激光管 1 产生的激光经透镜组后成为平行光束，经反射镜 4 到分光镜 5 将激光分为两路，一路到装在被测件 8 上的移动反射棱镜 7 而反射回来，另一路激光经反射镜 4 到固定反射棱镜 9 而反射回来。这两路反射回来的激光通过分光

镜 5 而汇合形成干涉。运动反射棱镜 7 随被测件 8 运动，使该路的光程变化，变化造成干涉条纹亮暗变化，被测件每移动 $\lambda/2$（λ 为激光波长），干涉条纹亮暗变化一周期。相位板 6 是为获得两路相位差为 90°的干涉条纹信号的细分和辨向用。该两路相差 90°的干涉信号通到干涉测量器 10 最后成为具有长度单位当量的脉冲，显示出被测件的移动距离。半圆光阑 3 是为防止返回激光回到激光管而设立的，使激光管工作稳定。

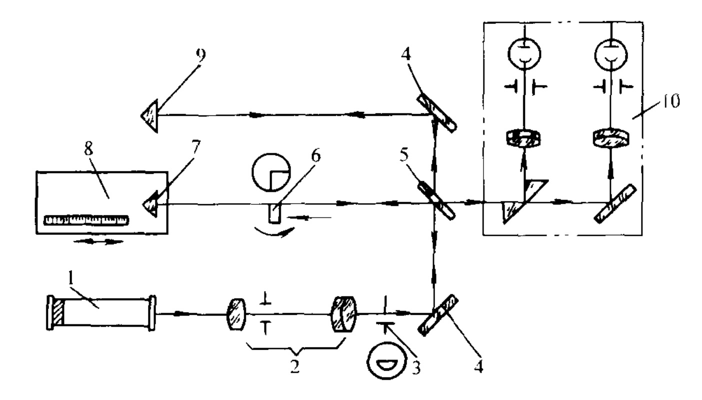


图 5-21　单频激光干涉测量系统原理图

1—氦氖激光管　2—透镜组　3—半圆光阑　4—反射镜　5—分光镜　6—相位板　7—移动反射棱镜　8—被测件　9—固定反射棱镜　10—干涉测量器

当激光的频率和幅值改变时，都将影响到单频激光干涉测量系统的精度，因此环境（气压、湿度，温度，气流等）变化将影响测量精度。

3. 双频激光测量原理

双频激光干涉测量系统受环境干扰的影响比单频激光测量系统要小很多，使测量精度大为提高，因而这种测量系统得以广泛的生产应用。

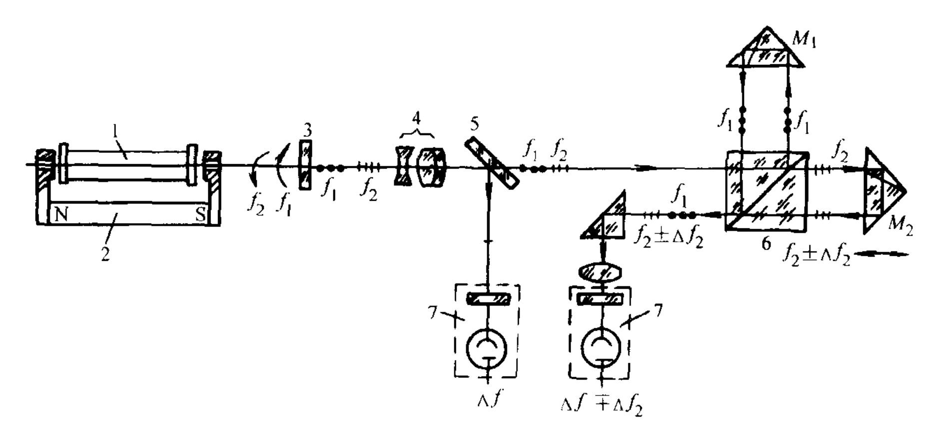


图 5-22　双频激光测量系统原理图

1—氦氖激光管　2—轴向强磁场　3—1/4 波片　4—透镜组　5—分光镜　6—偏振分光镜　7—干涉测量器　M_1—固定反射棱镜　M_2—移动反射棱镜

图 5-22 是双频激光干涉测量系统的原理图。氦氖激光管 1 输出的激光在轴向强磁场 2 的作用下分裂成频率为 f_1 和 f_2、旋向相反的两束圆偏振光。这两圆偏振光经 1/4 波片成为垂直和水平两个方向的线偏振光，经透镜组 4 成为平行光束。f_1 与 f_2 的频率差 $\Delta f(\Delta f = f_1 - f_2)$ 约为 1.2～1.8MHz，Δf 与氦氖激光频率（$\approx 4.74 \times 10^{14}$Hz）相比是极小的。激光 f_1 和 f_2 经过分光镜 5 分成两路，反射的一路光（约 4%～10%）经干涉测量器 7 获得 Δf 的拍频信号作为参考信号。其余大部分激光到偏振分光镜 6，这时垂直面的线偏振光 f_1 全部反射，经固定反射棱镜 M_1 而反射回来。水平面的线偏振光 f_2 全部透过偏振分光镜 6，经移动反射棱镜 M_2 而反射回来，由于移动反射棱镜随被测件移动，频率 f_2 将变成 $f_2 \pm \Delta f_2$，这两路反射回来的激光经过偏振分光镜 6 又汇合在一起，经反射镜而进入干涉测量器 7 而获得 $f_1 - (f_2 \pm \Delta f_2) = \Delta f \mp \Delta f_2$ 的拍频信号和前面的 Δf 参考信号比较，可以获得 $\pm \Delta f_2$ 的具有长度单位当量的交

流电信号。由于变化量 Δf_2 是一种频率调制信号，中心频率 Δf 与被测件移动速度无关，可用高放大倍数的窄带交流放大电路，故测量灵敏高且稳定。由于测量时用的是频率差 Δf，环境变化将使 f_1 和 f_2 同时变化，但其差值 Δf 则变化不大，故双频激光测量受环境干扰影响要比单频激光测量时小很多。

4. 激光测小角度原理

激光可用于测量小角度，其原理如图 5-23 所示。双频激光 f_1、f_2 进入偏振分光镜 1 后，垂直的线偏振光 f_1 全部反射，经反射镜 2 到测小角度双反射棱镜 3 的上棱镜而反射回去，由于反射镜 3 的移动，反射回去的激光频率为 $f_1 \pm \Delta f_1$。另一路水平的线偏振光 f_2 完全透过偏振分光镜到小角度双反射棱镜 3 的下棱镜而反射回去，由于反射镜 3 的移动，反射回去的激光频率为 $f_2 \pm \Delta f_2$。这两路反射回去的激光经偏振分光镜 1 后汇合。如果测小角度双反射棱镜 3 只是平移而没有倾斜，则 $\Delta f_1 = \Delta f_2$，最后读数没有显示；如果测角度双反射棱镜 3 倾斜 α 角，则经上棱镜与下棱镜反射的激光光程将不等，这时 $\Delta f_1 \neq \Delta f_2$，最后读数将显示 $2\Delta l$ 的长度信号。双棱镜的距离 D 为定值，α 角值很小，故 α 角即可求出：

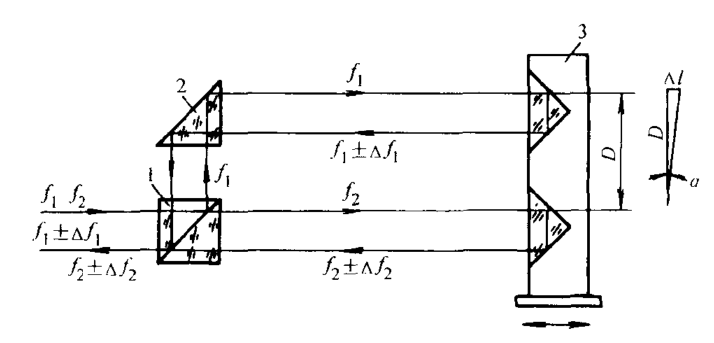


图 5-23 双频激光测小角度原理

1—偏振分光镜 2—反射镜 3—测小角度双反射棱镜

$$\alpha \approx \tan\alpha = \frac{\Delta l}{D}$$

5. 多路激光测量

经常遇到需要几路激光同时进行测量，如数控超精密车床需用两路激光同时测量（图 4-37），坐标测量机需用三路激光同时测量（图 4-40）。将一路激光用分光镜分为几路激光技术极为简单。图 5-24 所示为使用三路激光测量的 x-y 工作台，氦氖激光头 1 发出的激光经分光镜 2，一部分反射一部分透过而分成两路激光。如果作为测量参考的激光束需要的能量为总能量的 10%，其他三路各为 30%，则分光镜 2 反射 40%，透过 60%；反射的激光经过分光镜 3 时，反射 25% 作测量参考光束用，透过 75% 作为 x 向位移测量用；分光镜 2 透过的激光部分通过分光镜 4 时反射 50%，透过 50% 作为测量 y 向位移的两路激光。测量 y 向位移用两路激光测量目的在于监测工作台在水平面内的旋转，提高测量精度。分光镜的反射和透过部分的比例可按需要选用，以适应不同的工作需要。

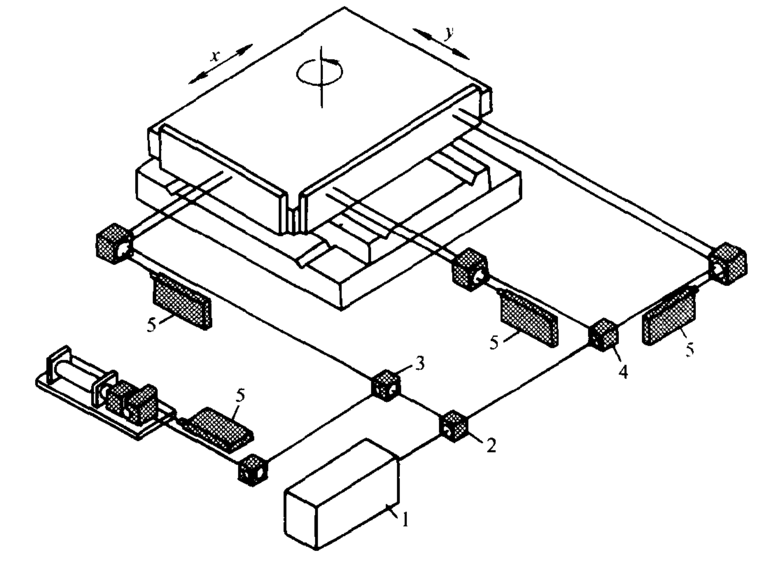


图 5-24 使用三路激光测量的 x-y 工作台

1—激光头 2、3、4—分光镜 5—干涉测量器

6. 激光测量中的空气参数补偿和提高激光测量精度

双频激光测量受环境干扰的影响虽已较单频激光测量时小很多，但对测量精度仍有相当大的影响。环境条件主要是温度、气压、湿度和气流变化，为提高精度，采用激光光路真空封闭或管路封闭，采用空气参数补偿。空气参数补偿是在测量环境下用精度较高的测温传感器、压力传感器和湿度计测出具体的温度、气压和湿度，计算出它们对激光测量造成的误差值，在激光测量结果中给予修正（现在使用计算机，这误差可以直接自动修正）。如果环境条件较差时，这误差值可能较大，故空气参数补偿在要求较高测量精度时是十分必要的。表 5-3 是美国 HP 公司提供的同一激光测量系统在有、无空气参数补偿时的测量误差值，可看到加空气参数补偿后测量精度大大提高。双频激光测量系统有空气补偿后，测量精度可以达到 $\pm 0.1\mu m$。

表 5-3 较差环境条件下空气参数补偿对激光测量误差的影响（测长 200mm）

误差项目	有空气参数补偿 /$\pm\mu m$	无空气参数补偿 /$\pm\mu m$
激光波长误差	0.004	0.004
补偿误差	0.028	1.8
行程终止误差	0.014	0.90
电测误差	0.005	0.005
光学非线性	0.0022	0.0022
余弦误差	0.01	0.01
合　计	$\pm$0.067	$\pm$2.725

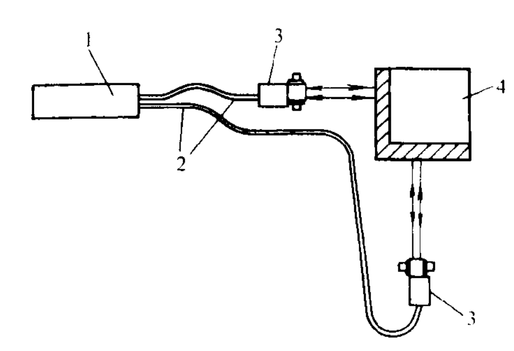


图 5-25 使用光纤的激光测量系统
1—激光头 2—光纤 3—干涉测量器 4—X-Y 工作台

高精度激光测量除了改进激光光路，电路和测量方法，减少测量误差外，很关键的问题是激光频率的稳定，现在用的激光测量系统中采用的稳频方法，不能满足高精度测量的要求。美国 LODTM 大型光学金刚石车床使用 SP125 氦氖激光器使用碘原子稳频器，使激光频率稳定性达到 10^{-9}。该激光测量系统的测量分辨率 0.625nm，测量精度 2nm。

7. 使用光纤的激光测量系统

日本东京精密公司生产了使用光纤的激光测量系统，如图 5-25 所示。激光测量系统中使用光纤传输激光，激光头可以随意放置，没有传输激光的固定封闭管路，给使用者带来极大方便，很受欢迎。但使用光纤传输双频激光还存在很大的技术难题，相互垂直的两个线偏振激光 f_1 和 f_2，经过光纤传输后出来时，这两个线偏振激光 f_1 和 f_2 的偏振面已经不是相互垂直，因此不能用偏振分光镜加以分离。故双频激光不能用光纤传输。日本生产的光纤传输的激光测量系统使用的是单频激光，因激光是在光纤内传输，故不易受环境条件变化的影响。据该公司自己称光纤传输的单频激光测量系统可以达到双频激光测量系统同样的测量精度。

8. 激光测量表面粗糙度和表面微观形貌

激光照射被测体表面时，反射率因表面粗糙度不同而有差异，可根据激光反射率测出表面粗糙度。这方法的优点是不接触测量，易于自动化。这方法测量的缺点在于，虽相同表面粗糙度，但加工痕迹不同或材料不同，将测出不同的结果。

激光测表面的微观形貌有不同方法。美国 WYKO 公司生产的 TOPO 测量仪是移相干涉

显微镜的典型代表，其光学原理见图 5-26，这方法可以直接测量干涉场上各点的相位，具有很高的空间分辨和测量精度，TOPO 测量仪的垂直分辨力为 0.1μm，水平分辨力为 0.4μm。测量速度快，在几十秒内就能算出表面粗糙度参数，并能给出干涉条纹图和被测表面的彩色三维形貌图，如图 5-27 所示。

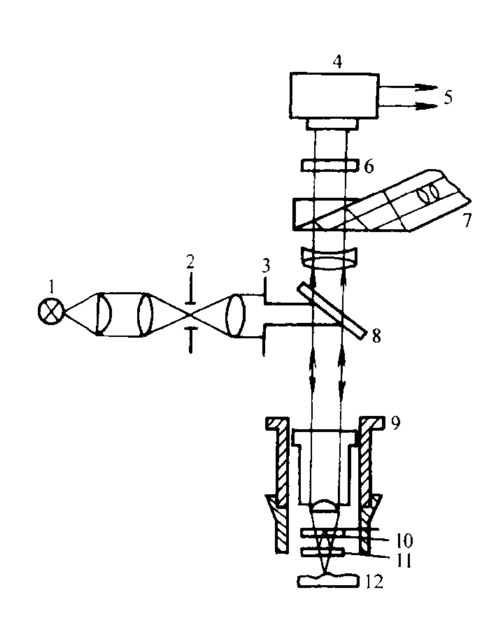
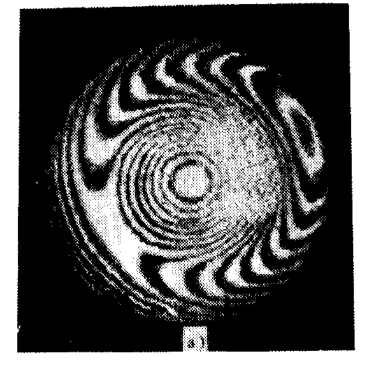


图 5-26　WYKO 公司的 TOPO 移相干涉显微镜的光学原理图

1—光源　2—视场光阑　3—孔径光阑　4—CCD 面阵探测器　5—输出信号　6—干涉滤波片　7—目镜　8—分光镜　9—压电陶瓷　10—参考板　11—分光板　12—被测件



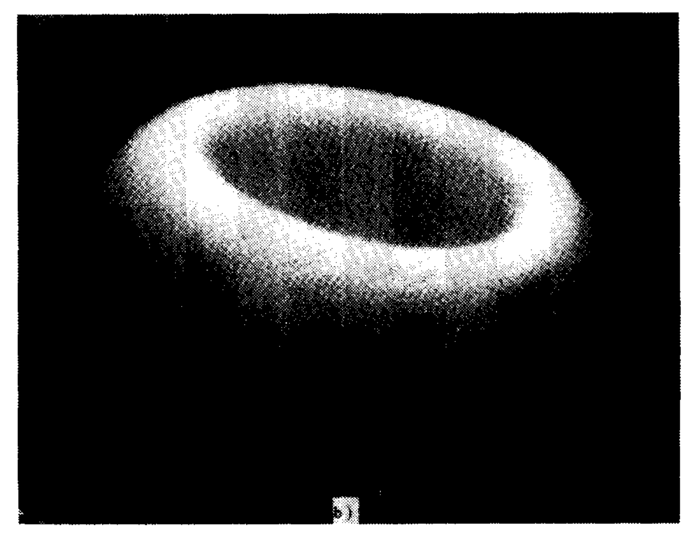


图 5-27　测出的表面微观形貌

a）表面形貌的干涉条纹图　b）表面的三维形貌图

复习思考题

5-1　精密测量技术有哪些新发展？

5-2　精密测量需要怎样的环境条件？

5-3　怎样选择量具和量仪的材料？

5-4　我国采用的长度标准是什么？现在国际上用的长度基准是什么？

5-5　如何正确使用量块以达到较高的测量精度？

5-6　精加工工厂如何选用自己的专用长度基准？

5-7　铸铁和花岗岩测量平台比较，各有哪些优缺点？

5-8　大型测量平台应如何支承以避免平台本身的变形？

5-9　简述直线度的检测原理和方法。

5-10　简述直线运动的直线度误差检测原理和方法。

5-11　平面度的检测原理和方法。

5-12　简述零件垂直度的检测方法。

5-13　精密测量中使用的测角原始基准有哪几种？

5-14　简述用正弦工作台测角度的原理和它的优缺点。

5-15　试述使用圆光栅和圆感应同步器的精密测量转台的主要优点和它能达到的测量精度。

5-16　试述精密多齿分度盘的测角原理，主要优点和能达到的测角精度。

5-17　试述精密多齿分度盘的小角度分度器的测量原理；结构和测角精度。

5-18　试述用两个多齿分度盘互检标定的原理和方法。

5-19　圆度有哪些测量方法？

5-20　试述圆度误差的评定方法。

5-21　圆度仪有哪两种结构型式？各自的优缺点如何？

5-22　影响圆度仪测量精度的因素有哪些？如何注意提高圆度仪的测量精度？

5-23　试述主轴回转精度的测量原理和方法。

5-24　试述单频激光测长度的原理。

5-25　试述双频激光测长度的原理。为何它比单频激光测量的精度高？

5-26　试述激光测小角度的原理。

5-27　如何将一路激光分成多路进行测量？

5-28　激光测量中使用空气参数补偿是否有必要性？加补偿后效果如何？

5-29　使用光纤传输的激光测量系统有哪些优点？存在什么问题？

5-30　试述用激光测量表面粗糙度和表面形貌的原理和达到的测量精度。

第六章　在线检测与误差补偿技术

第一节　概　　述

一、保证零件加工精度的途径

保证零件加工精度的途径有两条：一条是靠所用的机床来保证，即机床的精度要高于工件所要求的精度，这是所谓的“蜕化”原则，也称之为“母性”原则。例如要加工精密齿轮，就需要有高精度的齿轮加工机床，如高精度滚齿机、高精度插齿机和磨齿机等。不少制造厂为了保证所生产产品的质量，想方设法购买或自行研制精密机床。但在精密加工和超精密加工中，制造精密机床和超精密机床在技术上难度很大，耗资也很大，随着精度的不断提高，技术难度和耗资也越来越大，甚至达到不可能的程度。这就使人们提出另一条思路，即在精度比工件要求较低的机床上，利用误差补偿技术，提高加工精度，使加工精度比机床原有精度高，这是“进化”原则，也称之为“创造性”原则。因此近年来，误差补偿技术受到重视，发展很快。

从提高加工精度的角度来看，也有两条途径：一条是误差的隔离和消除，即找出加工中误差产生的根源，采取相应措施，使误差不产生和少产生，如加工理论误差可采取建立正确的运动关系和数学模型来消除，其中典型的例子是在卧式车床上车削模数螺纹时，螺纹导程$=\pi x$模数，式中x为倍数，由于有π这个因子，在选择配换齿轮来得到导程数值时，就可能是近似的加工运动，从而造成理论误差。又如加工时，机床精度不够高，可采用精度更高的机床，从而减小了机床精度的影响。另一条途径是误差的补偿，它立足于用相应的措施去“钝化”、抵消、均化误差，使误差减小，是一种“后天”措施，不是“先天”措施。随着加工精度的提高，要提高加工精度的难度就越来越大，采用误差补偿技术的意义也愈益重要，因此，在精密加工和超精密加工中，误差补偿技术已成为重要的手段之一。

二、加工精度的检测

要进行误差补偿，首先要进行精度检测，精度检测的环境（即场地）与误差补偿的关系比较密切，从精度检测所处的环境来看，精度检测可分为：离线检测、在位检验和在线检测。

1. 离线检测

工件加工完毕后，从机床上取下，在机床旁或在检测室中进行检测，就是离线检测，一般情况下，加工后的检测，如不加以说明，都是指的离线检测。

离线检测只能检测加工后的结果，不一定能反映加工时的实际情况，也不能连续检测加工过程的变化，但检测条件较好，不受加工条件的限制，可充分利用各种测量仪器，因此，测量的精度比较高。

目前，精密加工和超精密加工的精度越来越高，表面粗糙度值越来越低，已进入纳米级阶段，因此对检测的要求越来越高。对小尺寸的测量，电容式传感器测头的分辨率可达0.1nm（量程5μm）、频响>10kHz、线性误差小于0.1%；光电子纤维光学传感器测头的分辨率可达

0.5nm（量程 30μm）、线性误差为 5%；扫描隧道显微镜（STM）的分辨率可达 0.01nm（量程 20nm）。对于大尺寸的测量，外差式激光干涉仪的分辨率可达 1.25nm（量程±2.6m）；高精度氦氖激光干涉仪的分辨率可达 0.01nm（量程 2m）；光栅尺的分辨率可达 10nm（量程 1m）。对表面粗糙度的测量已不满足于接触式测量，已出现光学纤维传感器等非接触式测量仪器。检测情况与误差补偿的关系十分密切，若检测精度高，且稳定可靠，则误差补偿的效果也就越好。

2. 在位检测

工件加工完毕后，在机床上不卸下工件的情况下进行检测，称之为在位检测。这时所用的检测仪器可事先装好在机床上备用，也可临时进行安装使用。

在位检测也只能检测加工后的结果，也不一定能反映加工时的实际情况，同时也不能连续检测加工过程的变化，但可免除离线检测时由于定位基准所带来的误差，如加工时所用的定位基准与检测时所用的定位基准不重合，工件上定位基准的制造误差所造成的定位基准位移等。因此，与离线检测相比，其检测结果更接近实际加工情况。另外，如果检测后发现工件某些尺寸不合格，还可以进行返修（当然应有足够余量），而在离线检测情况下，很可能因为再次装夹所造成的误差而使得余量不够。所以在精密加工和超精密加工时，在位检测的应用比较广泛，但要仔细考虑检测仪器的选用、安装和检测方法，如果要借用机床本身的运动，则要考虑机床的运动精度，并在数据处理时能分离它们所造成的检测误差。由于在精密加工和超精密加工中所用机床的精度比较高，在位检测不失为一种好方法。

3. 在线检测

工件在加工过程中的同时进行检测，称之为在线检测，也有称之为主动检测、动态检测。

1）能够连续检测加工过程中的变化，了解在加工过程中误差分布和发展，从而为实时误差补偿和控制创造了条件。

2）检测结果能反映实际加工情况，如工件在加工过程中的热变形情况就可以通过在线检测来得到，而离线检测只能测量工件在冷态下的精度。

3）在线检测由于是在加工过程中进行，会受到加工过程中的一些条件限制，如检测传感器的安置，冷却液和切屑的状况，传感器的性能（灵敏度、频响、稳定性、抗干扰能力等）及尺寸等都会影响在线检测的可行性和测量结果的正确性。因此，在线检测的难度一般较大。

4）在线检测大都用非接触传感器，对传感器的性能要求较高，如测量工件圆度的电容传感器，测量工件直线度和机床导轨直线度的激光干涉仪，测量机床温度场分布和变化的红外传感器及热象仪等。非接触测量不会破坏已加工表面，这对精密和超精密加工是十分重要的，对离线检测、在位检测也是如此。但在在线检测时，由于检测时间长，接触式检测会造成测头磨损、接触状态不稳定等问题。

5）在线检测一般是自动运行，形成在线检测系统，包括误差信号的采集、处理和输出、与误差补偿控制系统的连接。因此它往往不是一种单纯的检测方法。

从检测对象来分，在线检测有两种类型：

1）直接检测系统　该系统直接检测工件的加工误差，并补偿之，是一种综合检验的方式，检测装置的安装位置、加工中的冷却液、切屑和振动的影响等都是比较难于处理的问题。误差信号的采集和处理也比较复杂，但其优点是直接反映了加工误差。

2）间接检测系统　该系统检测产生加工误差的误差源，并进行补偿，如对机床主轴的回

转运动误差进行检测和补偿，以提高工件的圆度；又如对螺纹磨床的母丝杠的热变形进行检测和补偿，以提高被加工螺纹的螺距精度。这种在线检测系统相对来说简单些，因为它与加工状况和环境的关系不大。

三、误差补偿技术

1. 误差补偿概念

在机械加工中出现的误差采用修正、抵消、均化、“钝化”等措施使误差减小或消除，就是误差补偿的概念。在装配过程中，也可利用误差补偿来提高装配精度。

在丝杠车床上为了提高螺距精度，常采用机械校正装置，它是通过杠杆将校正尺和母丝杠的螺母连接起来，校正尺上的修正曲线使母丝杠的螺母作附加微小转动，从而使刀架产生附加微小位移来补偿母丝杠的螺距误差，如图 6-1，这是修正法，或称校正法。

为了提高丝杠车床主轴的回转精度，在装配时人为地选择前后轴承的偏心量和偏心方向，如果选择前轴承的偏心量小于后轴承的偏心量，且两者的偏心在同方向，则可将偏心误差抵消一部分，从而提高了主轴的回转精度，如图 6-2，这是抵消补偿。

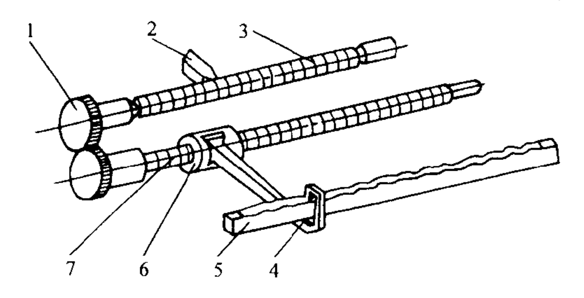


图 6-1　丝杠车床母丝杠螺距误差的修正（校正）

1—配换齿轮　2—螺纹车刀　3—工件　4—杠杆　5—修正尺　6—母丝杠螺母　7—母丝杠

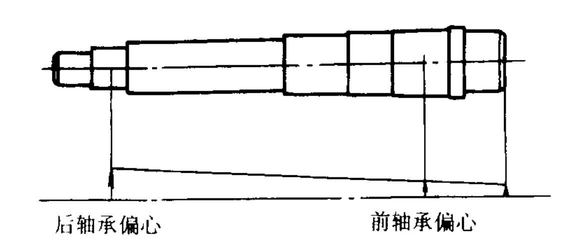


图 6-2　车床主轴径向圆跳动误差的抵消调整

多齿分度盘俗称鼠牙盘，是用两个齿数较多并相等的三角形端面齿的齿盘来分度的．其关键零件是上、下两个齿盘，采用四点易位对角研磨法进行终加工。研磨时，上齿盘上下运动与下齿盘产生研磨运动，两盘之间有研磨剂，在这过程中，上齿盘以正转 180°后反转 90°的顺序转位，其位置为 0°—180°—90°—270°—180°—360°—270°—90°—0°，八次为一循环，一次循环后，上齿盘相对下齿盘转动一个齿，再进行下一个循环，直至全部齿转完，如图 6-3。这种研磨方式是使齿距误差充分均化，可得到很高的分度精度，是一种误差补偿方式。在使用多齿分度盘进行分度时，也由于误差均化而获得很高的分度精度。

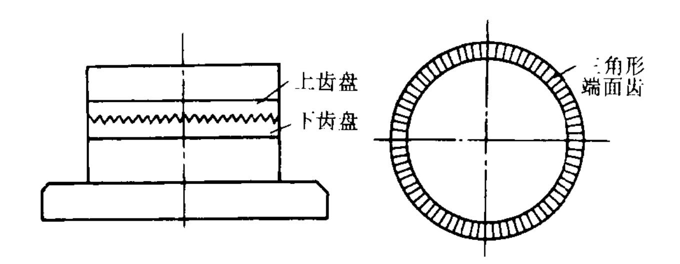


图 6-3　多齿分度盘齿距误差的均化

在进行车削加工时，由于导轨在垂直面上的纵向直线度会造成刀尖中心高位置的变化，从而影响工件的加工精度。如图 6-4a 所示，当刀具安装在水平方向位置，若刀尖位置下降 h 值时，工件在半径上尺寸会增大 ΔR，其关系为

$$(R+\Delta R)^2=h^2+R^2$$

$$h^2-2R\Delta R-\Delta R^2=0$$

因 ΔR 一般很小，忽略 ΔR^2 项，可得

$$\Delta R=h^2/2R$$

若将刀具安装在垂直方向位置，如图 6-4b 所示，当刀尖位置下降 h 时，工件在半径上尺寸会直接减小 h 值。可见刀具安装在水平方向位置时，刀尖位置下降不处于误差敏感方向，ΔR 与 h 是二次方的关系，影响较小。刀具安装在垂直方向位置时，刀尖位置下降正是处于误差敏感方向，影响较大。因此使误差出现在与误差敏感方向相垂直的地方就会减小其影响，这是使误差"钝化"，与误差敏感方向相垂直的方向称为误差迟钝方向。误差"钝化"也是一种误差补偿的方式。

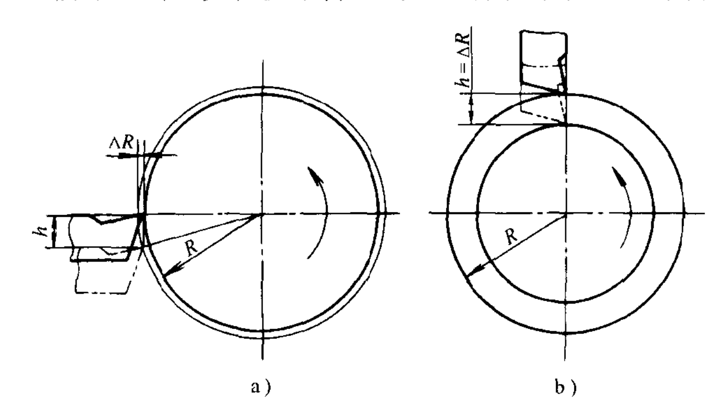


图 6-4　车削时导轨在垂直面上的纵向直线度所造成加工误差的"钝化"

a）刀具置于误差迟钝方向　b）刀具置于误差敏感方向

在测量精密轴系径向圆跳动时，常在其主轴上安装一个标准球，通过测量标准球的径向圆跳动作为该轴系的径向圆跳动。实际上，其检测结果包含了标准球的形状误差。对于精密轴系来说是不容忽视的，因此要将这部分误差分离出去，通常是在测量后通过数据处理来进行，这就是误差分离技术，它具有广泛的应用范围，常常是误差补偿系统中的一个组成部分，也被认为是误差补偿的一种形式。

从上述的几种情况可知，误差修正、校正、抵消、均化、"钝化"、分离等都是误差补偿的各种形式或方法，误差修正、误差校正通常是误差补偿的同义词，这是从误差补偿这一术语的广义角度来论述的。但从狭义的角度来分析，误差修正（校正）是指对测量、计算、预测所得的误差进行修正（校正）；误差分离是指从综合测量所得的误差中分离出所需的单项误差；误差抵消是指两个或更多个误差的相互抵消；而误差补偿应该是指对一定尺寸、形状、位置相差程度（差值）的补足，本章所论述的误差补偿主要是指这一种。

2．误差补偿的类型

误差补偿可根据不同的特征来分类。

（1）实时与非实时误差补偿　在加工过程中，实时进行误差检测，并随后紧接着进行误差补偿，就是实时误差补偿，也就是在线检测误差补偿，又称为动态误差补偿。其特点是：

1）误差补偿精度较高。

2）不仅可以补偿系统误差，而且可以补偿随机误差。因为在动态过程中误差值变化迅速、补偿在时间上总有滞后，对于随时间变化的变值系统误差（不能用数学模型表达的）和随机误差，不能全部补偿。

3）实现补偿的技术复杂，实施环境有限制，甚至有些情况不能进行实时误差补偿。

4）实施费用较高。

非实时误差补偿只能补偿系统误差，又称之为静态误差补偿。

（2）软件与硬件误差补偿　计算机技术的发展使得误差补偿可采用软件的形式进行，例如在数控机床的随动进给系统中，所采用的滚动丝杠尽管有消除间隙结构，但总会有反向间

隙（死区），如果其数值是稳定的，可通过增加脉冲数来进行补偿，以提高随动进给系统的精度。在闭环数控系统中，进给运动的移动量是由检测装置以脉冲计数方式反馈到数控装置的比较器中，与原来的指令脉冲数进行比较，当两者相等时，进给运动停止。这些都是软件补偿的实例，可见它是通过计算机对所建立的数学模型进行运算后，发出运动指令，由数控随动系统完成误差补偿动作。前述的丝杠车床母丝杠螺距误差补偿，采用校正尺来修正，是一种硬件补偿。因此，软件补偿与硬件补偿的区分是看补偿信息是由软件还是由硬件产生的。

软件补偿的特点如下：

1）有较高的动态性能，补偿值可随工作状态的变化而即时变化，即具有柔性。

2）补偿信息通过计算机对所建立的数学模型进行运算后产生，因此要有计算机控制系统，一般都是数控系统。

3）补偿系统机械结构简单、经济、工作方便可靠。

（3）单项与综合误差补偿　综合误差补偿是指同时补偿几项误差，如在精密车床上同时对工件的圆度和圆柱度进行误差补偿。显然，综合误差补偿比单项误差补偿要复杂，但效率高、效果好。

（4）单维与多维误差补偿　多维误差补偿是在多坐标上进行误差补偿，如在三坐标测量机上同时对三个坐标进行误差补偿，其难度和工作量都比较大，是近几年来发展起来的误差补偿技术。

此外，误差补偿还可以根据误差的类型来分类，如系统误差补偿和随机误差补偿，原始误差补偿和加工误差补偿等。原始误差是指造成加工误差的误差源，如原理误差、装夹误差、工艺系统的精度等。

3. 误差补偿过程及其系统组成

误差补偿的过程如下：

1）反复检测误差出现的状况，分析其数值和方向，寻找其规律，找出影响误差的主要因素，确定误差项目。

2）进行误差信号的处理，去除干扰信号，分离不需要的误差信号，找出工件加工误差与在补偿点的补偿量之间的关系，建立相应的数学模型。

3）选择或设计合适的误差补偿控制系统和执行机构，以便在补偿点实现补偿运动。

4）验证误差补偿的效果，进行必要的调试，保证达到预期要求。

误差补偿系统的一般组成如下：

1）误差信号的检测　它是误差补偿控制的前提和基础，由误差检测系统来完成。误差检测系统应根据误差补偿控制的具体要求来设计，它所检测的项目、采用的检测仪器以及检测精度要求等均与误差补偿的要求有密切关系。误差信号检测的可行性和正确性直接影响误差补偿的成功与否。

2）误差信号的处理　由误差检测系统所测得的误差信号，其中必然包含着某些频率的噪声干扰信号，也会有几种误差信号混合在一起，这就需要进行一些处理，分离不需要的信号，提取所需要的误差信号，并能够满足误差补偿的要求。误差信号处理的关键是要有足够的处理能力和处理速度，一般都采用快速高精度运算方法和高速处理器件来解决，最好能进行在线处理。现在大多采用性能优良的微型计算机来进行误差信号处理。

3）误差信号的建模　建模就是要找出工件加工误差与在补偿作用点上补偿控制量之间的

关系，称之为误差模型，由于通常都有数学关系，故可统称数学模型。在精密和超精密加工中，影响加工精度的因素很多，有些因素属于系统误差，其误差信号的处理和建模比较方便；但有些因素属于随机误差，其误差信号的处理和建模比较困难，工作量大。同时，由于误差信号的采集、处理、运算总需要一定的时间，会造成误差补偿控制与误差检测之间的时间滞后。当前，出现了随机过程建模方法，即把加工过程看成是一个随机动态过程，用时间序列分析方法建立其误差模型，它不仅可以描述当时加工过程的误差值，而且可以预测未来加工过程的误差值，从而弥补了误差补偿控制与误差检测之间的时间滞后，为在线误差检测与补偿创造了条件。

4）补偿控制　根据所建立的误差模型，并根据实际加工过程，用计算机计算欲补偿的误差值，输出补偿控制量。对于数控系统，补偿控制量就是正负脉冲数。

5）补偿执行机构　它是具体执行补偿动作的，设置在补偿点上。由于补偿是一个高速动态过程，要求位移精度和分辨率高、频响范围宽，结构刚度好，因此补偿执行机构多用微进给机构来完成。微进给机构又称之为微位移机构，有机械、电磁、压电等多种结构，可根据具体要求设计。值得注意的是补偿执行机构应与它配合使用的驱动控制电源作为一个系统来考虑。

图 6-5 是误差补偿系统组成示意图。

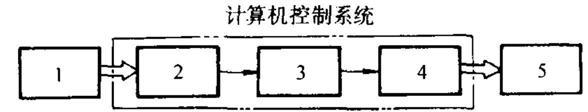


图 6-5　误差补偿系统组成示意图

1—误差信号检测　2—误差信号处理　3—误差信号建模　4—补偿控制　5—补偿执行机构

4．误差补偿技术的发展

在精密和超精密加工中，误差补偿技术显示了它的作用和效果，得到了飞速发展和广泛应用。但在误差补偿技术上，存在着两种截然不同的观点。一种观点认为机械产品的精度应靠零件和装配的精度来保证，这是硬功夫，是实实在在的精度，是稳定的，有持久性，对误差补偿采取全面否定的态度。另一种观点认为机械产品的精度要求越来越高，靠机械加工和装配来保证越来越困难，成本也越来越高，而且受到了当前制造水平的限制，利用误差补偿技术可以很方便地将产品的精度在现有水平上提高一步，有事半功倍之效，对误差补偿持肯定态度。实际上不必将此两种观点对立起来，因为误差补偿应该是在一定制造精度的水平上进行，而且受到不少条件的限制，所以第二种观点并没有否定第一种观点，它是第一种观点的补充。

误差补偿技术在精密和超精密加工中已经取得了卓越的成效，但大多是非实时误差补偿，当前正在进行在线检测与误差补偿的研究，它是精密制造技术、计算机技术、微位移技术、传感技术等多种技术密集的高新技术。

目前，在线检测与误差补偿正沿着以下几个方向发展：

1）预报型补偿　由于误差的检测与补偿之间总有一段时间上的滞后，不能形成真正的实时补偿。在动态数据系统（Dynamic Data System-DDS）建模方法的基础上，创立了预报补偿控制（Fore-casting Compensatory Control-FCC）技术，它利用在线随机建模理论、先进的传感技术、计算机技术、微位移技术等，可以对随机误差进行建模和预报，对动态误差进行实时补偿。实际上，它是时间序列分析、预报与控制在制造技术中的应用。

2）综合型补偿　当前的误差补偿技术及其补偿控制系统大多应用在单一加工过程，如车、铣、磨、镗等中，而且是针对工件的尺寸误差、形状误差和位置误差中的单项误差进行补偿

控制。现已开展对工件尺寸、形状和位置误差同时进行综合补偿，其中包括对尺寸、形状和位置一种误差中的多项误差进行综合补偿，如圆度和圆柱度的同时补偿；另外，也在加工中心等多功能机床上进行多工种补偿。

第二节　在线检测与误差补偿方法

一、形状位置误差的在线检测

形状位置误差的在线检测与补偿是制造技术中获得广泛应用的领域，其中有圆度、圆柱度、同轴度等外圆、孔类形状位置误差的在线检测与补偿，直线度、平面度等平面类形状位置误差的在线检测与补偿，还有齿轮、花键、丝杠等成形、分度、等距、均布等类形状位置误差的在线检测与补偿等等。由于外圆、孔、平面形状位置误差的在线检测与补偿相对来说比较简单，又有典型意义，故对它们作一简要论述。

1. 外圆、孔类形状位置误差的测量方法

外圆、孔类形状位置误差主要是针对超精密主轴系统的回转误差，它将直接影响工件的圆度，现在，不仅进行回转误差的静态测量，而且十分重视回转误差动态测量方法的研究。根据国际生产工程学会(CIRP)发表的“关于回转轴性能的描述和测定”，其主导思想是将测量信号中的测量基准圆误差和轴的回转误差分离开来，现在都是遵循这一基本理论和基本方法来进行测量。为此提出了三点法和转位法两种常用的误差分离方法。

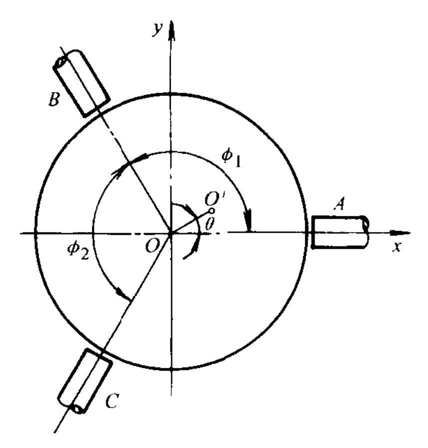


图 6-6　三点法测量原理

1)三点法　如图 6-6 所示，三点法误差分离原理是利用安装在同一测量平面，互成一定角度的 3 个传感器 A、B、C 的测量来实现的。图中 O 为 3 个传感器轴线的交点，也是坐标系设定的原点。O' 为机床主轴回转中心，它与坐标原点 O 有逆时针方向计量的向极角 θ 关系，设 $S(\theta)$ 为被测工件的轮廓误差，在任一时刻，O' 点的坐标为〔$x(\theta)$、$y(\theta)$〕，传感器 A、B、C 所测得信号分别为 $A(\theta)$、$B(\theta)$、$C(\theta)$，可知

$$A(\theta)=S(\theta)+x(\theta) \tag{6-1}$$

$$B(\theta)=S(\theta+\phi_1)+x(\theta)\cos\phi_1+y(\theta)\sin\phi_1 \tag{6-2}$$

$$C(\theta)=S(\theta+\phi_1+\phi_2)+x(\theta)\cos(\phi_1+\phi_2)+y(\theta)\sin(\phi_1+\phi_2) \tag{6-3}$$

式中　ϕ_1——传感器 A、B 间的位置角度；

ϕ_2——传感器 B、C 间的位置角度；

$S(\theta)$、$S(\theta+\phi_1)$、$S(\theta+\phi_1+\phi_2)$——分别为传感器 A、B、C 所测信号中工件形状误差部分。

从式(6-3)中消去 $x(\theta)$、$y(\theta)$，即可得到三点法测圆误差分离基本方程

$$\begin{aligned}&S(\theta)+C_2S(\theta+\phi_1)+C_3S(\theta+\phi_1+\phi_2)\\&=A(\theta)+C_2B(\theta)+C_3C(\theta)=P(\theta)\end{aligned} \tag{6-4}$$

式中　C_2——$-\sin(\phi_1+\phi_2)/\sin\phi_2$；

C_3——$\sin\phi_1/\sin\phi_2$；

$P(\theta)$——传感器组合信号。

上式可利用离散傅立叶变换(DFT)法、矩阵—平差法、广义逆矩阵法等求解。

测量时,若取采样点数为 N,则令

$$\theta=2\pi k/N$$

$$\phi_1=2\pi m_1/N$$

$$\phi_2=2\pi m_2/N$$

将式 6-4 离散化,可得

$$S(k)+C_2^*S(k+m_1)+C_3S(k+m_1+m_2)=P(k) \tag{6-5}$$

由于 $S(k)$、$P(k)$是周期序列,可对式 6-5 等号两边进行傅氏变换,利用傅氏变换的时延—相移特性求得 $S(k)$的傅氏变换,经处理后再进行傅氏反变换,即可求得 $S(k)$值。将 $S(k)$值代入式 6-3,便可求得任意时刻机床主轴回转运动误差 $x(k)$、$y(k)$

$$x(k)=A(k)-S(k) \tag{6-6}$$

$$y(k)=[B(k)-S(k+m_1)-x(k)\cos(2\pi m_1/N)]/\sin(2\pi m_1/N) \tag{6-7}$$

3 个传感器的相互位置对测量运算精度有一定影响,为了避免谐波失真,采样点数一般应等于基准点数 N_o。

$$N_o=2\pi/\Delta\phi \tag{6-8}$$

式中 $\Delta\phi$——ϕ_1、ϕ_2、2π 三个角度间的最大公因角。

三点法误差分离主要用于测量工件圆度误差，而且工件加工圆度误差与机床主轴回转误差为同一数量级的情况，可基于上述的测量方程式建立圆度误差分离数学模型来求解。现在，三点法又扩展到用于圆柱度、直线度等测量中。在进行圆柱度测量时，可将运动分解为工件绕其轴线的转动和测量架沿工件轴线方向的直线运动，这样从传感器所测得圆柱体各截面的轮廓误差便可得到整个圆柱体的形貌。

三点法只有在主轴回转完整一周后，才能求得其回转误差，因此，它虽是一种在线检测方法，但不能用于实时控制。

2）转位法　图 6-7 表示了转位法的测量原理，它采用圆光栅测量角度位置，用测微仪（测头传感器）测量工件形状误差和回转轴系运动误差，起点电路提供一个作为角度位置的起始点信号。分离工件和轴系误差的转位法有 3 种。

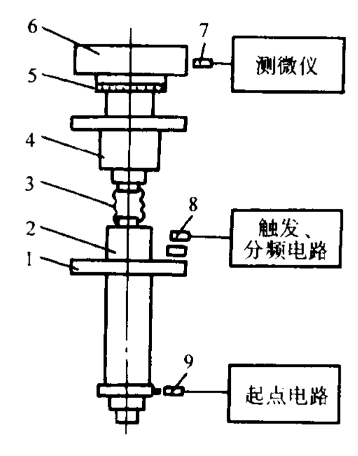


图 6-7　转位法测量原理
1—圆光栅　2—辅助轴　3—波纹管式柔性联轴节　4—被测轴系　5—调偏心及转位工具　6—工件　7—测头　8—光栅读数头　9—微动开关

1）反转法　测量时只作一次转位，即工件与测头传感器均相对于轴系回转 180°，共测得两组数据

$$V_1(\theta_i)=M_1(\theta_i)+S(\theta_i) \tag{6-9}$$

$$V_2(\theta_i)=-M_2(\theta_i)+S(\theta_i) \tag{6-10}$$

式中　$V_1(\theta_i)$、$V_2(\theta_i)$——分别为测头传感器两次所测得的两组信号；

$M_1(\theta_i)$、$M_2(\theta_i)$——分别为两次测得的回转轴系运动误差；

$S(\theta_i)$——测头传感器所测得信号中工件形状误差部分；

i——采样点序号；

θ_i——采样点角度位置。

由于反转法测量时,工件与测头传感器同时相对于轴系回转 180°,若整个检测装置的检测重复性好,则 $M_1(\theta_i)=M_2(\theta_i)=M(\theta_i)$,可得

$$S(\theta_i)=[V_1(\theta_i)+V_2(\theta_i)]/2 \tag{6-11}$$

$$M(\theta_i)=[V_1(\theta_i)-V_2(\theta_i)]/2 \tag{6-12}$$

这样就将工件形状误差与轴系回转误差分离开来。

反转法简单方便，但不能用于实时控制，也不能用于轴向运动误差的测量。

2）闭合等角转位法　又称多位法、转位互比法、步距法。每次转位时，测头不动，工件相对于轴系转 α 角，共测 m 个位置，$m\alpha=360°$，可得 m 组数据

$$V_i(\theta)=M_i(\theta)+S(\theta+i360°/m) \tag{6-13}$$

式中　$V_i(\theta)$——测头传感器在某个位置所测得的一组信息；

$M_i(\theta)$——测头传感器在某个位置所测得的一组回转轴系运动误差；

$S(\theta+i360°/m)$——测头传感器在某个位置所测得的一组信号中工件形状误差部分；

i——测量位置序号，$i=1\sim m$。

当 m 很大时，$S_i(\theta)$的平均值可忽略不计，可得回转轴系平均运动误差 $M(\theta)$

$$M(\theta)=[\Sigma V_i(\theta)]/m \tag{6-14}$$

闭合等角转位法可用于测量径向和轴向运动误差，这种方法不动测头，容易保证转位准确，操作方便。但由于 m 很大，测量工作量很大，且不能测得高次谐波，也不能用于实时控制。

3）对称转位法　这种方法是在 0°位置测完后，测头不动，工件相对于轴系各作一次 $+\beta$、$-\beta$ 转位角，$+\beta$ 转位角与 $-\beta$ 转位角方向相反，可取转位角 β 等于采样间隔角 θ，一共可得到 3 组数据

0°位置　$$V_0(\theta_i)=M(\theta_i)+S(\theta_i) \tag{6-15}$$

$+\beta$ 位置　$$V_2(\theta_i)=M(\theta_i)+S(\theta_{i+1}) \tag{6-16}$$

$-\beta$ 位置　$$V_1(\theta_i)=M(\theta_i)+S(\theta_{i-1}) \tag{6-17}$$

式中　i——采样序号，$i=1\sim n$；

$V_0(\theta_i)$、$V_2(\theta_i)$、$V_1(\theta_i)$——测头传感器分别在 0°、$+\beta$、$-\beta$ 位置所测得的信号；

$M(\theta_i)$——测头传感器所测得回转轴系运动误差；

$S(\theta_i)$——测头传感器所测得信号中工件形状误差部分。

一般取 $\beta=\theta$，而且满足 $n|\beta|/180°$为整数，同时 n 为 β 互质。

检测中，在 0°、$+\beta$、$-\beta$ 位置只是工件相对于轴系作正、反方向转位，测头相对于轴系位置未变，若检测装置重复性好，则在 3 个位置上所测回转轴系运动误差应相等，均为 $M(\theta_i)$。

由于 $\beta=\theta$，故在 $+\beta$ 位置上所测工件形状误差应为 $S(\theta_{i+1})$，而在 $-\beta$ 位置上所测工件形状误差为 $S(\theta_{i-1})$。

由式(6-15)、式(6-17)可得

$$V_1(\theta_{i+1})-V_0(\theta_i)=M(\theta_{i-1})-M(\theta_i)=M_1(\theta_{i+1}-\theta_i) \tag{6-18}$$

由式(6-15)、式(6-16)可得

$$V_0(\theta_{i+1})-V_2(\theta_i)=M(\theta_{i+1})-M(\theta_i)=M_2(\theta_{i-1}-\theta_i) \tag{6-19}$$

上两式是由 $\pm\beta$ 转位所得，等号一边虽相等，但实测数据不同，取平均值

$$M(\theta_{i+1}-\theta_i)=[M_1(\theta_{i+1}-\theta_i)+M_2(\theta_{i+1}-\theta_i)]/2 \tag{6-20}$$

由此可得一般式

$$M(\theta_{i-1}-\theta_i)=\left[\sum_{i=1}^{n}M_1(\theta_{i+1}-\theta_i)/n+\sum_{i=1}^{n}M_2(\theta_{i-1}-\theta_i)\right]/2 \tag{6-21}$$

从式 6-18、6-19 可得

$$M(\theta_{i+1}-\theta_i)=[V_0(\theta_{i+1})-V_0(\theta_i)+V_1(\theta_{i+1})-V_2(\theta_i)]/2 \tag{6-22}$$

对称转位法可用于测量径向和轴向运动误差，操作方便，但检测工作量较大，也不能用于实时控制。

2. 平面类形状位置误差的测量方法

平面类形状位置误差主要是针对超精密机床的导轨直线度、工作台的台面直线度和平面度等。在测量中的关键问题之一也是如何分离工件形状误差和机床直线运动误差，常用的方法有反转法、平移法、两点法和三点法等。

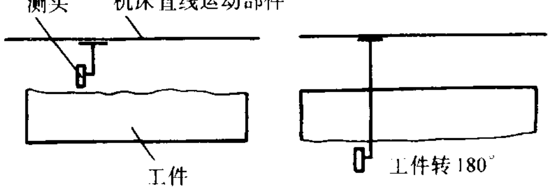


图 6-8　反转法测量

1）反转法　图 6-8 为反转法的工作原理，测量分两次进行，在第二次测量时，工件转过 180°，这样得到两组数据

$$V_1(x_i)=M_1(x_i)+S(x_i) \tag{6-23}$$

$$V_2(x_i)=-M_2(x_i)+S(x_i) \tag{6-24}$$

式中　$V_1(x_i)$、$V_2(x_i)$——分别为测头两次所测得的两组信号；

$M_1(x_i)$、$M_2(x_i)$——分别为两次测得的机床直线运动误差；

$S(x_i)$——测头所测信号中工件形状误差部分；

i——采样点序号；

x_i——采样点 x 方向直线位置。

若检测装置重复性好，可认为

$$M_1(x_i)=M_2(x_i)=M(x_i)$$

可得

$$S(x_i)=[V_1(x_i)+V_2(x_i)]/2 \tag{6-25}$$

$$M(x_i)=[V_1(x_i)-V_2(x_i)]/2 \tag{6-26}$$

这种方法简单方便，由于测量需进行两次，不能用于实时控制。对于垂直方向的形状位置测量可视具体情况而定。

2）平移法　图 6-9 为平移法的工作原理，测量分两次进行，在第二次测量时，工件平移一个步距 S，这样得到两组数据

$$V_1(x_i)=M(x_i)+S(x_i) \tag{6-27}$$

$$V_2(x_i)=M(x_i)+S(x_{i+1}) \tag{6-28}$$

由于只是工件相对于测头移动了一个步距，若机床和检测装置重复性好，可认为

$$M_1(x_i)=M_2(x_i)=M(x_i)$$

可得

$$S(x_i)-S(x_{i+1})=V_1(x_i)-V_2(x_i) \tag{6-29}$$

图 6-9　平移法测量

这种方法简单方便，但不能用于实时控制，且测量误差会产生累积。

3）两点法　如图 6-10 所示，取步距 S 为两测头的间距进行测量，则为两点法。若将机床直线运动部件的角运动误差 $\varepsilon(x_i)$ 忽略不计，则可得到与平移法相同的两个方程式(6-27)、(6-28)。

这种方法当所选步距越小，则机床直线运动部件的角运动误差的影响越小，但随着步距数的增大，测量误差的累积也增大。由于测量是在一次测量中两测头同时读数，故可用于实时控制。

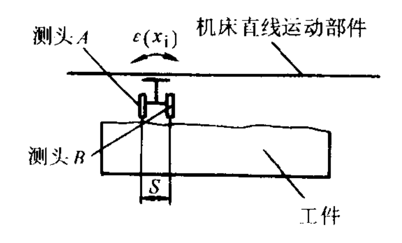


图 6-10 两点法测量

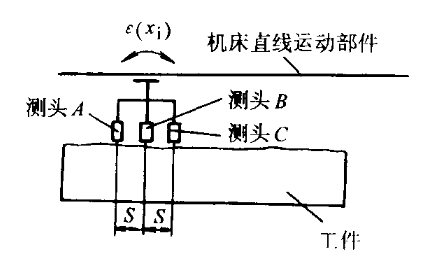


图 6-11 三点法测量

4）三点法 如图 6-11 所示，用间距为步距 S 的三个测头进行测量，则可考虑机床直线运动部件角运动误差 $\varepsilon(x_i)$，这时可得到 3 组方程

$$A(x_i)=M(x_i)+S(x_{i-1})+\varepsilon(x_i) \tag{6-30}$$

$$B(x_i)=M(x_i)+S(x_i) \tag{6-31}$$

$$C(x_i)=M(x_i)+S(x_{i+1})-\varepsilon(x_i) \tag{6-32}$$

将式(6-30)与式(6-32)相加后减去 2 倍的式(6-31)，可得

$$A(x_i)+C(x_i)-2B(x_i)=S(x_{i-1})+S(x_{i+1})-2S(x_i) \tag{6-33}$$

令 $S(0)=S(x_i)=0$，可由上式算出其它的 $S(x)$。

三点法可避免机床直线运动部件角运动误差的影响，它可用于实时控制。这种方法的困难是要把三点调到一条直线上，因为这三个点形成一个测量基准，如果三点不在一条直线上，则势必形成一个圆弧，就会出现调整误差 δ，若步距数为 n，由此造成的误差将与 $n^2\delta$ 成正比，因此这种方法不适于用在步距数较多的情况。3 个测头的调整可利用一个标准平面预先调好，由于这种方法能够用于在线检测中并可实时控制，故有较好的应用前景。

二、在线检测与误差补偿系统应用实例

1. 车削工件圆度和圆柱度的误差补偿

图 6-12 是哈尔滨工业大学开发的在国产 S1-255 超精密车床上进行圆度和圆柱度随机误差补偿控制的实验系统，该系统主要由机床主轴回转误差实时测量系统、建模与预报、主从控制系统、驱动电源及电致

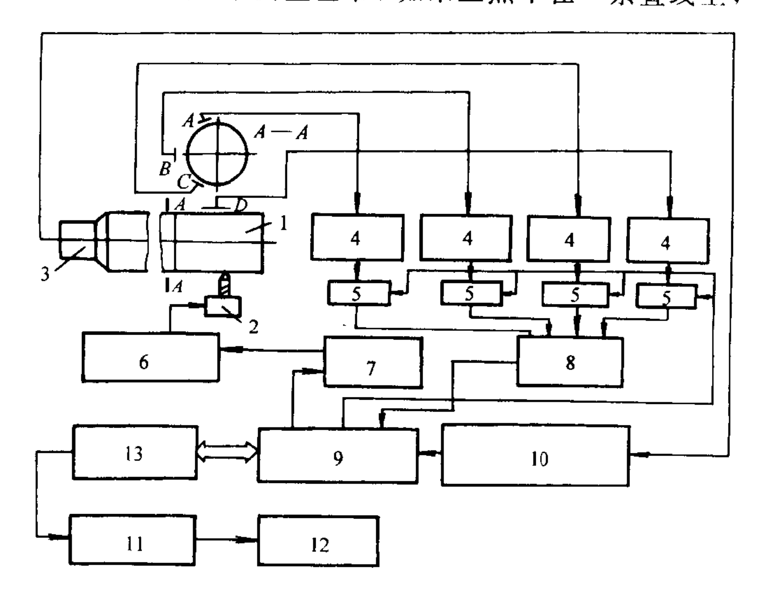


图 6-12 车削工件圆度和圆柱度的误差补偿
1—工件 2—补偿执行机构 3—光电码盘 4—电容测微仪 5—S/H 6—驱动电源 7—D/A 8—A/D 9—高速信号处理器 10—分频电路 11—信号处理 12—建模预报 13—微机

伸缩微进给机构组成。测量系统中，由带有微调机构的扇形测量架和底座组成测量装置，沿扇形测量架的圆周方向装有 3 个电容测头 A、B、C，沿其轴线装有另一电容测头 D。4 台电容测微仪的输出信号经 4 路采样保持（S/H），模数转换（A/D）后读入到计算机系统，装在车床主轴后端的光电码盘产生同步脉冲及采样脉冲。由 PC/XT 计算机、TMS32010 高速信号处理器构成的数据采集主从系统完成误差信号的采集、数据预处理、三点法误差分离计算、数据建模和预报，以及存贮、绘图和打印等工作。误差补偿执行机构是一个电致伸缩式微进给刀架，其静刚度为 41.7N/μm、自振频率为 7.95kHz、位移范围为 5.2μm、线性度为 0.3%、位移分辨率优于 0.025μm，阶跃响应特性很好。实验结果表明，工件圆度误差平均减小 40%，工件圆柱度误差平均减小 23%。

2. 磨削工件圆度的误差补偿

图 6-13 是美国 Wisconsin 大学进行外圆磨床主轴径向圆跳动误差补偿控制的实验系统，该系统主要由微处理器、检测装置和液压伺服驱动系统组成。微处理器通过时间序列分析方法，进行误差在线建模，根据所建立的模型预报外圆磨床主轴在补偿点上的径向圆跳动误差补偿运动值，通过控制液压伺服驱动机构推动工件沿砂轮径向进给，进行工件圆度的补偿控制磨削。检测装置由传感器、基准盘、圆感应同步器组成。补偿加工后，工件圆度误差由 0.74μm 减少到 0.375μm，由于采用的是液压伺服补偿机构，其频响只有 30Hz。

3. 镗削工件内孔圆柱度的误差补偿

图 6-14 是美国 Wisconsin 大学进行镗削工件内孔圆柱度误差补偿系统。通过分析，明确了造成工件内孔圆柱度误差的主要原因是镗杆径向圆跳动误差和直线运动的直线度误差。由激光器发出的激光束作为基准光线照射在装在镗杆上的棱镜上，棱镜反射光线位置的变动就反映了镗杆的运动误差，用一只 x、y 两向光传感器检测棱镜反射光线位置的变动，所测得的信号经测量系统分析处理后传给计算机系统建模，然后预报出镗杆在镗刀各个切削位置的误差补偿运动，通过驱动控制压电陶瓷补偿执行机构进行内孔镗削补偿加工。补偿后的内孔圆柱度误差减少了 56%～64%。

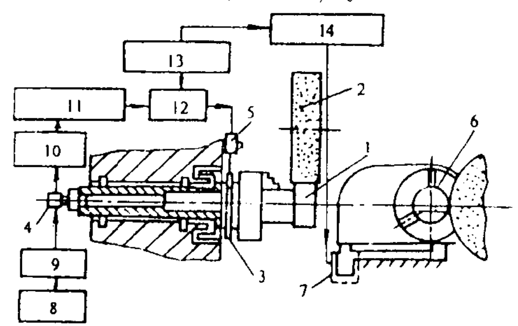


图 6-13　磨削工件圆度的误差补偿

1—工件　2—砂轮　3—基准盘　4—圆感位同步器　5—传感器　6—三爪自定心卡盘　7—驱动系统　8—电源　9—放大调解　10—相调器　11—解调器　12—放大器　13—微处理器　14—控制器

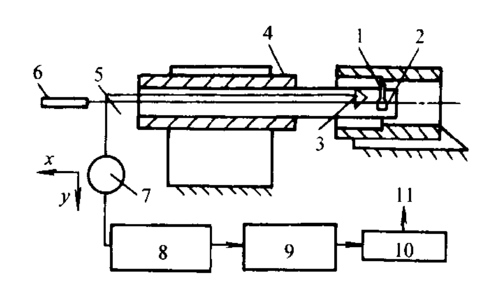


图 6-14　镗削工件内孔圆柱度的误差补偿

1—镗刀　2—补偿执行机构　3—棱镜　4—主轴轴系　5—分光镜　6—激光器　7—x-y 双向光传感器　8—测量系统　9—建模与预报　10—控制器　11—至压电陶瓷补偿执行机构

4. 立铣工件直线度的误差补偿

整个误差补偿系统由在线测量系统、微机建模与预报系统、补偿驱动系统等组成。工件直线度的在线测量系统由发出两束激光束的激光器、两只触针式光传感器和一根作为基准直

线的精密直线尺组成，采用两点法直接测量。所测数据经补偿计算机系统处理后，进行随机数据建模。由于测量位置和铣刀切削位置不同，存在时间滞后，故采用超前预报。根据预报误差控制电液伺服驱动系统，使铣床主轴带动铣刀作上下运动而进行补偿。该系统使直线度误差减少了 80%，是美国 Wisconsin 大学研究的，如图 6-15 所示。

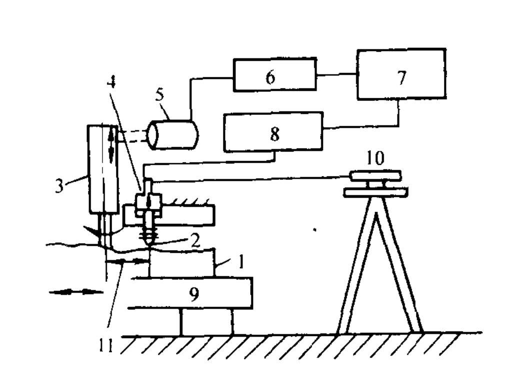


图 6-15　立铣工件直线度的误差补偿

1—工件　2—测针　3—切削主轴　4—光传感器　5—驱动系统　6—控制器　7—建模与预报　8—测量系统　9—机床工作台　10—激光器　11—测量滞后

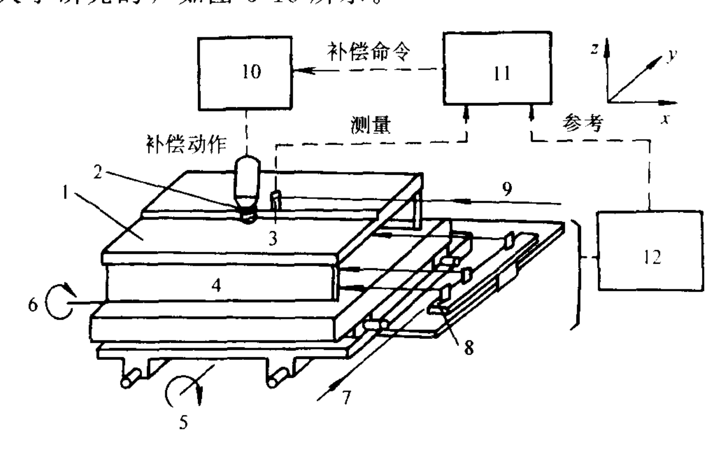


图 6-16　数控立铣工件平面度的误差补偿

1—工件　2—刀具　3—测针　4—夹具　5—步进电动机 1　6—步进电动机 2　7—激光束 1　8—支承　9—激光束 2　10—伺服驱动器　11—微机　12—几何平面误差测量系统

5. 数控立铣工件平面度的误差补偿

如图 6-16 所示，该实验系统由激光平面度误差在线测量、液压精密定位和微机控制三部分组成。平面工件被装夹在夹具上，夹具装夹在工作台上，夹具内装有一套平面度误差测量系统，一束激光束作为测针，另一束激光束用于产生三束反射光线，采用三点法直接测量。两台步进电动机分别带动工作台沿切削方向和进给方向移动，由相应的软件控制。测量所得数据经测量系统分析处理后传给计算机系统建模，并进行预报，驱动液压伺服执行机构对工件进行平面度误差补偿。该系统也是美国 Wisconsin 大学研究的，可将平面度误差减少 80%左右。

6. 精密丝杠螺距的误差补偿

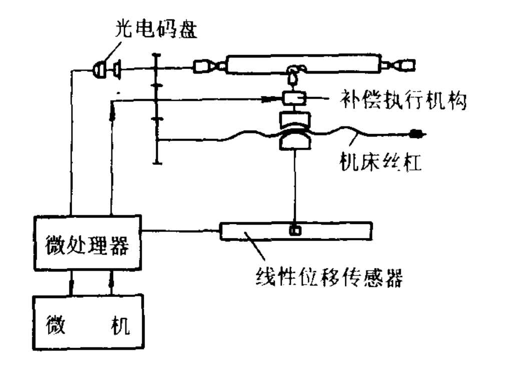


图 6-17　精密丝杠螺距的误差补偿

图 6-17 为精密丝杠螺距的误差补偿系统，该系统由微机、微处理器、测量系统、补偿执行机构所组成。光电码盘每转发出一定数量脉冲（如 2048、1024 个）测量主轴的回转位置，线性位移传感器（如光栅等）测量溜板相应于主轴回转位置的位移，将此两组数据送入微处理器进行在线分析处理，得出车床母丝杠的螺距误差数据，再送入微机进行建模、通过微处理进行预报控制，驱动压电陶瓷车削补偿执行机构作螺距误差补偿，其单个螺距误差可减少 89%，累积螺距误差可减少 99%，可见效果显著。

第三节 微位移技术

一、微位移系统及其应用

微位移系统一般由微位移机构、检测装置和控制系统所组成，其目的是要实现小行程（一般小于毫米级）、高灵敏度和高精度（一般为亚微米、纳米级）的位移。微位移机构是实现微位移的执行机构，其核心部分是微位移器件，由于其原理、方案、结构的不同，微位移机构有多种多样；检测装置是用来测量微位移的移动量及其精度，在闭环系统中作为反馈信号；控制系统用来控制整个系统的工作，通过控制策略实现需求的技术性能指标。通常，微位移系统多以微动工作台的形式出现。

随着精密和超精密加工的发展，微位移系统的应用愈来愈广泛，大致有以下几方面：

1）微进给　在精密和超精密加工中，利用微位移机构来实现准确的微进给量、或微吃刀量，以保证加工精度。在精密机床中，利用微位移机构来实现精密对刀。

2）误差补偿　作为误差补偿系统中的补偿执行机构，提高加工精度。在精密机床、仪器中，通常采用粗精相结合的两套进给系统，构成两个工作台来实现大行程的高精度位移，其中粗进给系统所形成的粗工作台实现高速大行程，而精进给系统所形成的微动工作台对粗工作台的运动进行误差补偿，从而达到高精度的位移。

3）精密调整　在精密机械、仪器中，经常有精密对准、精密调整等问题，例如调整浮动间隙、调整焦距、对准坐标原点等，均可借助于微位移机构。

二、微位移机构的类型

目前，微位移机构发展很快，种类很多。从其原理来看，可分为机械、液压、电动三大类，其原理、简图、特点如表 6-1 所示。

表 6-1　微位移机构和器件

类别	原理	简图	特点	类别	原理	简图	特点
机械	凸轮		定位精度 1～2μm 行程大	机械	精密丝杠螺母副		定位精度 0.3μm 行程很大 制造精度要求高
	斜面		定位精度 0.1μm 行程大		差动丝杠螺母副		定位精度 0.1μm 行程大 结构复杂 应用广泛

（续）

类别	原理	简图	特点
机械	杠杆		定位精度1～2μm 结构简单 应用广泛
机械	弹性变形件 薄壁弹性元件		定位精度±0.2μm 稳定、无摩擦、无间隙、无爬行 应用广泛
机械	弹性变形件 柔性铰链		定位精度±0.05μm 分辨率1nm 稳定、无摩擦、无间隙、无爬行 应用广泛
液压	弹性薄膜		定位精度±0.5μm 需要液压系统 稳定、可靠
电动	电热变形		定位精度0.5μm 有发热问题，需考虑冷却

类别	原理	简图	特点
电动	电磁 电磁控制		定位精度0.2μm 行程大 结构简单，易于实现控制 应用广泛
电动	电磁 磁致伸缩		定位精度0.5μm 有发热问题，需考虑冷却
电动	机电耦合效应 电致伸缩		定位精度0.01μm 变形量与外电压成平方关系 结构紧凑
电动	机电耦合效应 压电效应 铁电晶体		定位精度0.01μm 分辨率0.015μm 变形量小
电动	机电耦合效应 压电效应 压电晶体		定位精度0.01μm 分辨率0.1nm 变形量小 应用广泛

1. 机械类微位移机构

这类微位移机构主要是利用一些巧妙的机械结构来实现微位移，典型的结构有凸轮、斜面、精密丝杠螺母副、差动丝杠螺母副、杠杆、精密齿轮齿条和蜗轮蜗杆副、弹性变形件等。其共同的特点是精度不能太高、结构复杂、制造技术难度大，但性能比较稳定、价格便宜、使用方面，应用十分广泛。

弹性变形件是一种很有应用前景的微位移器件，它可制作成薄片、铰链、伸缩管、扭摆等形式，可实现单坐标或双坐标位移，图6-18表示了柔性铰链结构形状，单轴柔性铰链是一维的，双轴柔性铰链是二维的，两者均有截面形状为圆形和矩形两种。柔性铰链是作绕轴有限角位移复杂运动的弹性支承，广泛应用于制作微动工作台的弹性导轨、支承，其微位移精度较高。

2．液压类微位移机构

这类微位移机构多采用液压为动力、弹性膜片为弹性变形元件实现微位移，因此是一种机械液压复合式的微位移机构。由于它需要一套液压装置，因此多用于一些已具有液压系统的设备中，如液压机床、静压主轴等。在薄膜反馈的静压轴承中，薄膜的微位移就是这类微位移机构的典型实例。

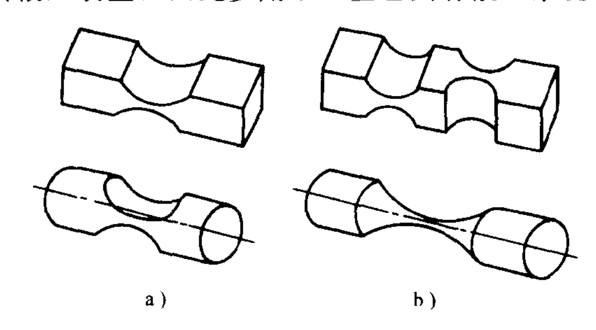


图 6-18 柔性铰链结构形状
a）单轴柔性铰链 b）双轴柔性铰链

3．电动类微位移机构

这类微位移机构实际上是机电结合来实现微位移的，它又可分为电热、电磁、机电耦合效应（电致伸缩、压电效应）等多种。

电热式是利用电热转换，使材料受热伸长而微位移，根据这一原理可制成电热伸缩筒或电热伸缩棒等微位移器件。

电磁式是利用电磁力、（电）磁致伸缩等原理来实现微位移，相应有电磁控制、磁致伸缩等类型的微位移机构或器件。

电致伸缩、压电式微位移机构是应用材料的电致伸缩现象、压电效应来实现微位移，可制作相应的电致伸缩器件、压电效应器件而用于各种场合。

在设计微位移工作台时，往往采用多种微位移机构和器件的复合结构以保证其性能。

三、典型微位移工作台

1．平行弹性导轨微位移工作台

利用弹性材料制作微位移元件，有高精度、高稳定性、无摩擦、无间隙和无爬行等特点。它可作为位移元件、传感元件、量测元件、柔性铰链和弹性导轨等，应用十分广泛。

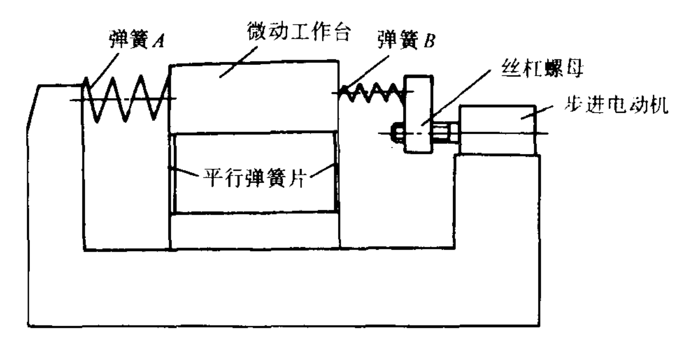


图 6-19 平行弹性导轨微位移工作台

弹性导轨一般是由一些薄壁弹性元件（如膜片、膜盒等）和支承元件、连接元件等组成。图 6-19 所示即为由平行弹性导轨构成的微位移工作台，该弹性导轨由两个平行的弹簧片组成，微动工作台支承其上。微动工作台的微位移是利用两个刚度相差很大的弹簧 A 和 B 所形成的位移差来得到。若设步进电动机的输入位移为 x_1，微动工作台的输出位移为 x_2，两个弹簧的刚度分别为 k_A、k_B，则可得

$$x_2 = x_1 \frac{k_B}{k_A + k_B} \tag{6-34}$$

如果 $k_A \gg k_B$，则可得到微位移输出。例如：当 $k_A : k_B = 99 : 1$ 时，缩小比为 1/100，这时从步进电机输入 10μm 位移，可得到 0.1μm 的微动输出。

这种微位移工作台结构简单，但所承受的外力、移动导轨部分的摩擦力将直接影响定位精度，另外对于步进输入状态，容易产生过渡性振荡，对动态精度不利，要增加阻尼环节来改善。

2. 电磁控制微位移工作台

图 6-20 表示了一种电磁控制微动工作台，工作台用 4 根链条或金属丝悬挂起来，其两个水平方向的一端各用两个弹簧固定，另一端各安装了一套电磁铁及铁磁体，铁磁体装在工作台的端面上。通过改变电磁铁线圈的电流来控制电磁铁对铁磁体的吸引力，从而克服弹簧的作用力，使工作台产生微位移。

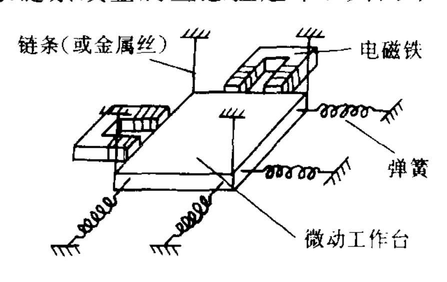


图 6-20 电磁控制微位移工作台

设微动工作台在某方向移动 x 值时，此时工作台应保持平衡，若忽略工作台移动时的摩擦力（如悬挂系统、导轨等处的），则电磁铁的吸引力 F 应等于弹簧的拉力 F_S，电磁铁的吸引力 F（单位为 N）为：

$$F=B^2A/(2\mu) \tag{6-35}$$

式中 B——磁通密度，单位为 T；

A——磁极截面面积，单位为 m^2；

μ——磁导率，单位为 H/m。

弹簧的拉力 F_S（单位为 N）为：

$$F_S=kxg \tag{6-36}$$

式中 k——弹簧的刚度，单位为 N/m；

x——工作台移动距离，单位为 m；

由上两式可得

$$x=B^2A/(2\mu kg) \tag{6-37}$$

可见工作台移动的距离与磁通密度的平方成正比，改变通过电磁铁线圈的电流便可以改变磁通密度，就可控制工作台的位移。由于磁通密度与通过线圈的电流和线圈圈数成正比，因此工作台移动的距离与通过电磁铁线圈的电流和线圈圈数乘积的平方成正比。

当电磁铁线圈通入电流后，随着电流的逐渐增大，工作台位移加大，气隙越来越小，磁通增大，吸引力也增大，当达到一临界值时，工作台上的铁磁体将与电磁铁相撞。为了解决这一问题，可将工作台位移达到初始间隙的 1/3 时，使磁通达到饱和。在此气隙内，磁通密度几乎与通过线圈的电流和线圈圈数的乘积成线性关系。

电磁控制微位移工作台结构简单，控制系统易于实现，行程大，驱动力也较大，位移分辨率可达 0.1μm，因此应用比较广泛，有单坐标、双坐标甚至多坐标的电磁控制微位移工作台实例。

3. 磁致伸缩微位移工作台

从物理学得知，将某些材料放置于磁场中，会产生尺寸和形状变化，这种现象称为磁致伸缩效应。铁磁材料、铁铝合金有正伸长特性，镍有负伸长特性，而钴、钴合金（钴钢）等视材料组织成分可有正或负伸长特性。利用磁致伸缩材料可制作磁致伸缩器件，改变磁场强度就可控制伸长率。利用磁致伸缩器件便可构成微位移机构和微位移工作台。

由于在磁致伸缩的同时有热效应现象出现，材料会发热，使用时要考虑冷却问题，另一方面，其精度也会受到影响，因此在应用上尚不够广泛，难于用在超精密微位移中。

4. 电致伸缩微位移工作台

从物理学得知，电介质在外电场的作用下，由于感应极化的作用而产生应变，其应变大

小与电场强度的平方成正比，而其应变方向与电场方向无关，这种现象称为电致伸缩效应。所有的电介质晶体都有电致伸缩效应，改变电场强度就可以控制应变大小。比较成熟的电致伸缩材料有铌镁酸铅系列（PMN，它是由 PbO、MgO、Nb_2O_3、TiO_2、$BaCO_3$、ZrO 等按比例烧结而成）、具有大电致伸缩效应的弛豫铁电体、具有大电致伸缩效应和良好温度稳定性的双弛豫铁电体，以及我国研制的 La：PZT（铅、锆、钛）铁电陶瓷系列等。

利用电致伸缩材料可制成电致伸缩器件，最早将材料制成 ϕ25.4mm、厚 2mm 的圆片，10 片叠粘在一起，外接 2.9kV 电压，可得 13μm 位移，分辨率为 1nm。我国研制 WTDS-1 型电致伸缩微位移器，45mm 长；外加电压 300V，可产生 25μm 的位移，分辨率为 0.08μm/V，推力大于 100N；该器件工作电压低、位移量大、分辨率高、再现性（位置重复性）好、无剩余变形和老化现象、迟滞现象小、热膨胀系数低。

电致伸缩器件具有结构紧凑、体积小、分辨率高、无发热现象、控制简单等特点，已广泛应用于各种微位移工作台中。

5. 压电效应微位移工作台

（1）压电效应　电介质受到机械应力作用时，会产生电极化（表面产生电荷），电极化的大小（电荷密度）与施加的机械应力成正比，电极化的方向随应力的方向而改变，这种现象称为正压电效应，简称压电效应。压电效应和电致伸缩效应统称为机电耦合效应。

电介质在外电场作用下，将产生应变，应变大小与电场大小成正比，应变的方向与电场的方向有关，当电场的方向改变时，应变的方向也随着改变，这种现象称为逆压电效应，微位移器件正是应用了逆压电效应。

（2）压电材料　压电材料有铁电晶体和压电晶体两类。常用的铁电晶体为铁电陶瓷，其变形量大，但电致伸缩性比压电性好，故在压电中应用较少。

常用的压电材料是压电晶体，不是所有的晶体都有逆压电效应，只有无对称中心的晶体才有。常用的压电晶体材料有钛酸钡压电陶瓷、锆钛酸铅系压电陶瓷（PZT），它们都是多晶固溶体，还有新型高分子材料聚偏二氟乙烯（PVDF）等，用在微位移上的大多是锆钛酸铅系压电陶瓷，其灵敏度高、机电耦合系数大、材料性能稳定性好、相变温度高（300℃），可作高温压电元件。压电晶体材料中还有压电单晶，如石英，多用于制作传感元件。目前，压电陶瓷的最大缺点是变形量小。

（3）压电微位移器件　压电晶体可制成管状、片状等压电微位移器件，并应用它们构成微位移机构及工作台。管状压电器件是用管形压电陶瓷件，在其内管壁镀银形成电极，施外电压后管端伸缩而实现精密微位移。片状压电器件呈圆片状，两端面镀银形成电极，由于单片的微位移太小，一般都是多片串叠粘接使用。

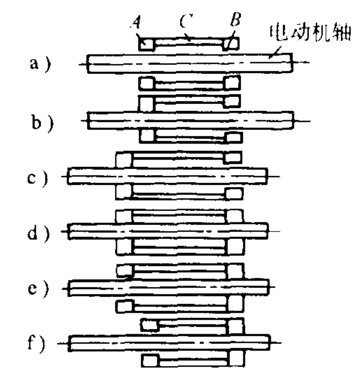


图 6-21　尺蠖式压电陶瓷电机

a）原始非工作状态　b）器件 A 夹紧电动机轴　c）器件 C 伸长　d）器件 B 夹紧电动机轴　e）器件 A 松开　f）器件 C 收缩恢复

A、B—径向伸缩压电器件

C—轴向伸缩压电器件

（4）尺蠖式压电陶瓷电机　如图 6-21 所示，尺蠖式压电陶瓷电机是由三个单独控制的管状陶瓷压电器件组成，其中器件 A、B 作径向伸缩，以便夹紧和松开电机轴，而器件 C 作轴向伸缩，使电机轴产生轴向位移，实现步进直线运动。

图中所示的六个工作状态分别为：

a）原始非工作状态；

b）器件 A 加电压后直径缩小夹紧电动机轴；

c）器件 C 加电压后轴向伸长推动器件 A 并使电动机轴向某一轴向方向作步进运动；

d）器件 B 加电压后直径缩小夹紧电动机轴；

e）器件 A 不加电压后恢复原状松开电动机轴；

f）器件 C 不加电后、轴向收缩恢复原状。

每一循环使电动机轴轴向移动一步，加电压的顺序反向，电动机反向移动。这种电动机步进量为 0.5～5μm，移动速度可达 1～50μm/s，行程很大。但其性能与压电陶瓷器件的伸缩精度、稳定性、器件与电机轴的夹紧可靠程度，以及夹紧时对定位位置的影响（即夹紧时是否会移动定位位置）等有关。

（5）三坐标压电微位移工作台　图 6-22 为由压电器件构成的三坐标微位移工作台全貌，它由两坐标粗动工作台和三坐标微动工作台构成。粗动工作台由直流伺服电动机驱动，采用了聚四氟乙烯的滑动—滚动导轨，定位精度为±5μm。粗动工作台与微动工作台之间由 4 个柔性支柱相连，每个柔性支柱的两端各有一个柔性铰链，形成弹性导轨，见图 6-23 所示。

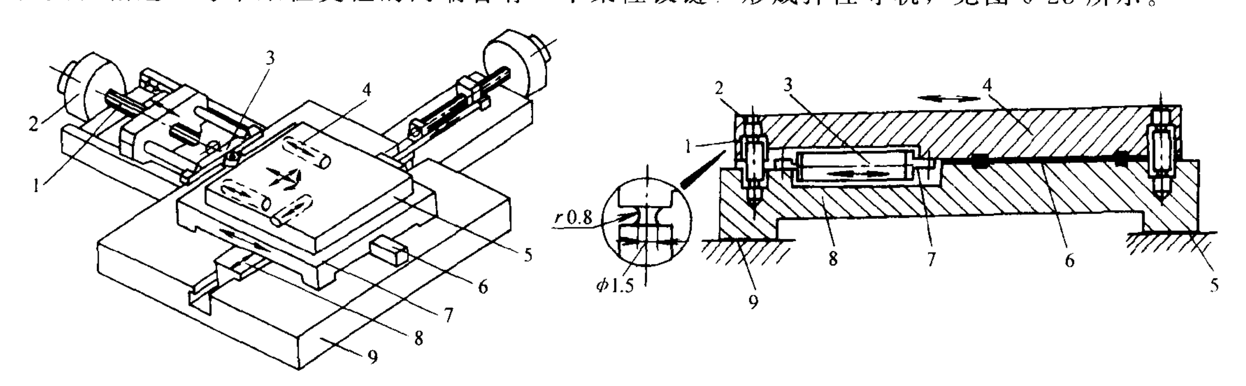


图 6-22　三坐标压电微位移工作台

1—滚珠丝杠　2—直流伺服电动机　3—滚轮框架　4—管状压电器件　5—微动工作台　6—y 向导轨　7—粗动工作台　8—x 向导轨滑块　9—基座

图 6-23　柔性支柱弹性导轨

1—柔性铰链　2—柔性支柱　3—管状压电器件　4—微动工作台　5—基座　6—硅油层　7—柔性铰链　8—粗动工作台　9—聚四氟乙烯层

微动工作台是靠 3 个管状压电器件得到 x、y 方向移动及绕 z 轴转动的微位移。管状压电器件如图 6-24 所示，其两端有输出端，输出端上有柔性铰链，中间是一个由压电晶体制成的压电管，管上连有导线，管的两端有陶瓷层与输出端绝缘。当通过导线外加 600V 直流电压时，可得到变形量 18μm。3 个管状压电器件的布置如图 6-22 和图 6-25 所示，可见只要控制 3 个管状压电器件上的外加电压，便可得到 3 个坐标上的微位移。

设 3 个管状压电器件的变形量分别为 Δx、Δy_1、Δy_2，则 x 方向的微位移为 Δx，y 方向的微位移为 $\Delta y=(\Delta y_1+\Delta y_2)/2$，绕 z 轴的转动为 $\Delta\theta_c=(\Delta y_1-\Delta y_2)/L$，见图 6-25。

微位移工作台的种类很多，可利用各种微位移器件、导轨结构，可设计成各种结构形式来满足不同需求。但从共同的要求来看，都应具有足够高的精度、一定的工作行程和频响范围，有一定的运动速度、线性位移特性、无间隙、无爬行和良好的制动性能，同时应控制方便、稳定可靠和良好的抗干扰能力。

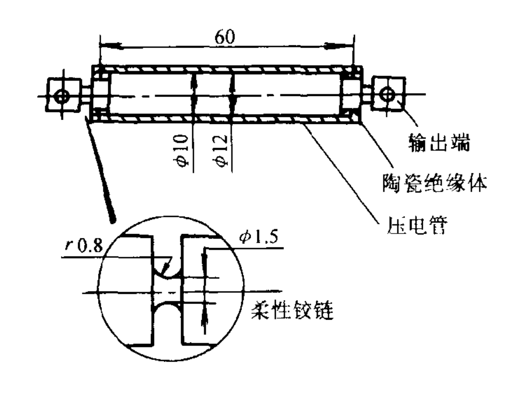


图 6-24 管状压电器件

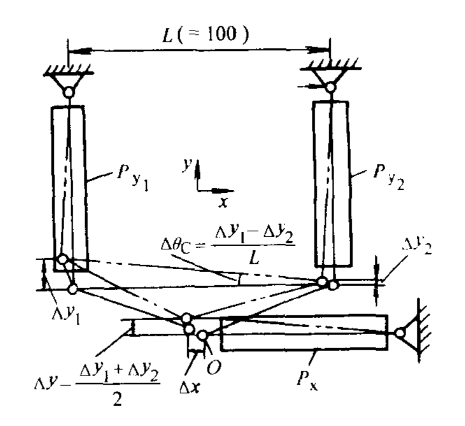


图 6-25 管状压电器件布局图

复习思考题

6-1 从提高加工精度的角度来看，试论述误差的隔离和消除、误差的补偿两条途径。

6-2 试阐述离线检测、在位检测和在线检测的含义，并分析其特点。

6-3 试论述进行在线检测的条件。

6-4 说明误差补偿的概念及其各种形式。

6-5 举例说明误差修正、误差校正、误差抵消、误差均化、误差“钝化”、误差分离等概念。

6-6 试述软件误差补偿与硬件误差补偿的特点及其相互间的关系。

6-7 论述综合误差补偿、多维误差补偿、预报型误差补偿的含义和意义。

6-8 试述误差补偿的过程。

6-9 试述误差补偿系统的组成及各组成部分的作用。

6-10 试分析三点法误差分离原理及其在误差测量中的应用。

6-11 试分析三种转位法误差分离原理及其在误差测量中的应用。

6-12 平面类形状位置误差的测量中，利用哪些方法来分离误差，它们在原理上有哪些共同点。

6-13 分析图 6-12 中车削工件圆度和圆柱度误差补偿的原理和特点。

6-14 通过在线检测与误差补偿系统应用实例（图 6-12、6-13、6-14、6-15、6-16、6-17）总结在线检测与误差补偿的特点。

6-15 试述微位移系统的作用及其组成。

6-16 分析各种微位移机构和器件的性能、特点及其应用场合。

6-17 分析平行弹性导轨微位移工作台的特点及其应用。

6-18 分析电磁控制微位移工作台的特点及其应用。

6-19 分析电致伸缩微位移工作台的特点及其应用。

6-20 分析压电效应微位移工作台的特点及其应用。

6-21 试比较电致伸缩材料和压电材料的特点。

6-22 如何应用变形量小的压电陶瓷元件来制作长行程的微位移机构。

6-23 如何利用 3 个管状压电器件来实现 x、y 方向移动和绕 z 轴转动的微位移。请参考图 6-25 布局自行设计。

第七章　精密研磨和抛光

第一节　研磨抛光机理

一、研磨加工的机理和特点

研磨加工，通常使用1μm大小的氧化铝和碳化硅等磨粒及铸铁等硬质材料的研具进行研磨。

1. 研磨时磨粒的工作状态

1）磨粒在工件与研具之间进行转动；

2）由研具面支承磨粒研磨加工；

3）由工件支承磨粒研磨加工面。

但是，由于工件、磨粒、研具和研磨液等的不同，上述三种研磨方法的研磨表面状态也不同。例如，研磨玻璃、单晶硅等硬脆性材料，需要修整由微小破碎痕迹构成的无光泽面。而且由于条件不同，对淬火工具钢等可确保有块规那样的光泽表面。由于工件材料质量的不同，研磨面状态也各不相同。总之，这种表面的形成，是在产生切屑、研具的磨损和磨粒破碎等综合在一起的复杂情况下进行的。

2. 硬脆材料的研磨

研磨硬脆材料时，其磨屑产生的情况如下。在玻璃面上几乎看不到有方向性的划伤，当然，散布有磨粒转动所引起的裂纹并在部分表面上还产生相当于磨屑的碎片。这时的裂纹类似玻璃面上压金刚石压头所产生压坏的情况。由于硬脆材料的抗拉强度比抗压强度小，在给压头加压时，就在拉伸应力最大部位产生裂纹并呈垂直状、圆锥状和八字状等形态。特别是圆锥状和八字状裂纹，当解除压头的压力时，最初产生的裂纹中的残余应变复原，结果新产生的拉伸应力大的部分将破裂而成碎片。这就是经常引证的硬脆材料研磨时切屑生成的基本模型，在实际研磨时也能充分地观察到同样的现象。但是，如图7-1加工模型所示，磨粒不是作用于镜面而是作用在有凸凹和裂纹等处的表面上，并产生磨屑。因而，在实际研磨中，认为因磨粒的转动和滑动引起的裂纹有助于产生磨屑是妥当的。

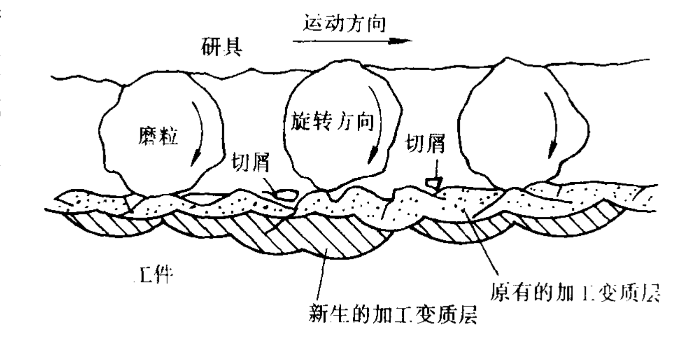


图7-1　研磨加工的模型

研磨硬脆材料时，重要的是控制产生裂纹的大小。必须使零件加工时不发生重大的破坏，而另一方面，为了提高加工效率又必须促进微小的破碎。为了有利于最后工序的镜面加工又要减小破碎，这可以通过磨料粒度的选择来实现。

3. 金属材料的研磨

金属材料的研磨在加工机理上和脆性材料的研磨有很大不同。用压凹坑硬度测量，当强制压下压头时，发生塑性变形，只是在表面上留有凹坑的痕迹而不像硬脆材料那样发生破碎。

研磨时，磨粒的研磨作用可看作是相当于普通切削和磨削的切削深度极小时的状态。但是，由于是使用游离状态的磨粒，难以形成连续的切削，可以推测，通过转动和加压，磨粒与工件间仅是断续的研磨动作，这与磨屑的产生是一致的。

金属材料的研磨，其特点之一是没有裂纹，可是对于铝材等软质材料，研磨时有很多磨粒被压入材料内。但是，研磨刀具和块规那样的硬质淬火钢时，由于材料组织非常细密，使用 1μm 左右的微小氧化铬磨料和采用铸铁研具进行研磨，可获得表面粗糙度达 0.02μm 的镜面，也能进行高精度形状尺寸的加工。

二、抛光加工的机理和特点

抛光也和研磨一样，是将研磨剂擦抹在抛光器上对工件进行抛光加工。但是，抛光使用的磨粒是 1μm 以下的微细磨粒，而抛光器则需使用沥青、石蜡、合成树脂和人造革等软质材料制成，即使抛光硬脆材料也能加工出一点裂纹也没有的镜面。

抛光时磨粒的变化如图 7-2 所示。微小的磨粒被抛光器弹性地夹持研磨工件。因而，磨粒对工件的作用力很小，即使抛光脆性材料也不会发生裂纹。

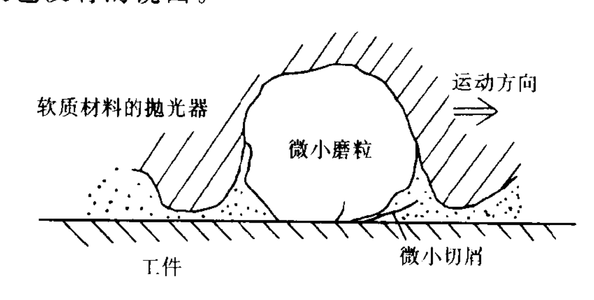


图 7-2 抛光加工的模型

用加载 1g 左右的金刚石压头划削磨成镜面的硅片时，也像划削金属材料一样，因塑性变形而形成槽。可以观察到在槽的两侧有隆起和微小的切屑，据此，足以推测出没有产和裂纹。

抛光的加工机理是：

1）由磨粒进行的机械抛光可塑性地生成切屑。但是它仅利用极少磨粒强制压入产生作用。

2）借助磨粒和抛光器与工件流动摩擦使工件表面的凸凹变平。

3）在加工液中进行化学性溶析。

4）工件和磨粒之间有直接的化学反应而有助于上述现象，也不可忽视。

通过工件、磨粒、抛光器和加工液等的组合，起的作用应当是各不相同的。例如，以化学活性溶液作加工液的机械—化学抛光，就是一种重点提高加工质量的超精密加工方法。

三、研磨、抛光的加工变质层

在一般情况下，材料不管采取什么加工方法，材料加工部位均要产生变质层。即使仅用柔软的布料简单地擦拭一下材料表面，其表层的原子也会被剥离，使原子排列紊乱。就是放在浸蚀液中浸渍时，如有适宜浸渍元素，其表面组成也会发生变化。另外，有时还会被水合膜及氧化膜所掩盖。与此相比，机械加工表面上会形成各种各样的变质层，使材料的本质有显著的损伤。

当然，在超精密研磨和抛光中要求这种加工变质层越少越好或完全没有变质层。

加工变质层使工件材质的结构、组织和组成遭到破坏或接近于破坏状态。在变质层部分存在变形和应力，还有其物理的和化学的影响等。硬度和表面强度变化等机械性质和耐腐蚀性化学性质也与基体材料不同。因而，压电性、半导体性能、磁性、光吸收性等物理特性变差，制成工件时，会直接或间接地影响其性能。

硬脆材料经研磨后的表面，如图 7-1 所示，由于有微细的裂纹，加工后会在该部位继续留有裂纹。例如，对经研磨的单晶硅表面，使用氟、硝酸系列的溶液进行化学浸蚀，依次去掉表层，用电子衍射法进行晶体观察时，从表层向内部的顺序为非晶体层或多晶体层、镶嵌结构层、畸变层和完全结晶结构。另外，从使用X射线衍射法的弹塑性学的观点来评价，则表层是由极小的塑性流动层构成，其下是有异物混入的裂纹层，再下则是裂纹层、弹性变形层和主体材料。单晶硅是脆性极强的材料，研磨过的表面外观是破碎的。但是，在极薄表层检测出有塑性流动层。据此推测，其它的单晶、多晶、非晶质等硬脆材料也有类似情况。

在研磨金属材料时，虽不发生破碎，但是磨粒转动和刮削时，由于材料承受了塑性变形，通常形成与上述硅片相类似的加工变质层。相反，例如是多晶的金属材料，则越接近被加工的表层，晶粒越微细，累积位错在最表层，变成非晶质状态。在这部分，金属与大气中的活性氧结合，变得活跃。另外，有时发生因塑性变形而使磨粒等容易嵌进金属。

其次，关于抛光的加工变质层，即使工件是硬脆材料，抛光时也不会出现裂纹，加工变质层的结构与深度应当与研磨有相当大的不同。

抛光用作石英振子的基板时，加工变质层最为典型。板的厚度为 35μm，而且要求加工成高精度平行平面，自古以来，在制造玻璃透镜和棱镜时，均采用有成效的光学抛光。由氧化铈磨粒和沥青研具精加工的镜面，其加工变质层的结构可使用氟化铵的饱和水溶液腐蚀来检测。根据检测结果得知，由表层向组织内部的结构顺序是抛光应力层，经腐蚀出现的 2 次裂纹应力层，2 次裂纹影响层和完全结晶层，整个深度为 3μm。

第二节　精密研磨、抛光的主要工艺因素

上面着重叙述了有关研磨和抛光的加工机理和加工变质层，现将有关工艺因素汇总于表 7-1。这些因素对实施超精密研磨加工至关重要。

表 7-1　精密研磨抛光的主要工艺因素

项	目	内　　容
研磨法	加工方式 加工运动 驱动方式	单面研磨、双面研磨 旋转、往复 手动、机械驱动、强制驱动、从动
研　具	材料 形状 表面状态	硬质、软质、人造、天然 平面、球面、非球面、圆柱面 有槽、有孔、无槽
磨　粒	种类 材质、形状 粒径	金属氧化物、金属碳化物、氮化物、硼化物 硬度、韧性、形状 几十 μm～0.01μm
加工液	水质 油质	酸性～碱性、界面活性剂 界面活性剂
工件、研具相对速度		(1～100) m/min
加工压力		0.01～30N/cm²
加工时间		～10h
环　境	温度	室温设定温度±0.1C
	尘埃	利用净化槽、净化操纵台

研磨，由于作为最终加工或作为超精密抛光的前加工是不同的，其加工条件当然也是不同的，对于残留有裂纹的硬脆材料进行镜面研磨时，必须有确保超精密、高精度、高效率的加工条件。对于研磨不产生裂纹的金属材料，有时也需要进行抛光，如果只用研磨就能达到超精密加工，则需选择与抛光同样的加工条件。

研磨方式有单面研磨和双面研磨两种，特别是双面研磨能同时高效率研磨工件的平行平面和圆柱、圆球等。

1）作为超精密研磨、抛光用的研磨机其功能应能均匀地加工工件，研具磨损要小并要求能容易修整精度。

2）作为工具的研具和抛光盘工作面的形状精度会反映到工件表面上，所以，必须减少因工作面磨损和弹性变形引起的精度下降。同样，研具材料的选择也与研磨机的选定一样重要。

3）作为加工质量的表面粗糙度和加工变质层的深度，受磨粒和研具的机械作用所支配。为了实现超精密研磨和抛光，需要使用微细的磨粒和使磨粒作用工件很浅的研具材料。另外需控制研磨时的速度和压力等，这些均与加工效率有关，但是，要特别注意，速度和压力过大会造成质量下降。若能适宜地供给磨粒和加工液及顺利地排屑，则研具磨耗与它们的相对速度、压力和时间成正比，因此，可以保证研磨具有良好的耐磨性。

研磨和抛光时，伴随有发热，因此，可以推测出，除了工件和研具因温度上升而发生变形，难以进行高精度研磨外，在局部的磨粒作用点上也会产生相当高的温度，这对加工变质层的产生具有很大的影响。加工液具有提供磨粒、排除切屑、冷却发热和减轻不必要摩擦的效果。对金属材料，要考虑到防锈效果，要采用油质加工液，有时也使用添加肥皂等活性剂的水质加工液。但是，如超精密加工不允许存在加工液膜，这就要采用在研具面上均匀地涂上一层磨料的干式手工研磨方法。当前块规的制造就是采用这种方法。

研磨和抛光在确保像光学平晶和平行平晶那样极高加工质量和加工精度方面，还存在若干关键问题有待解决。

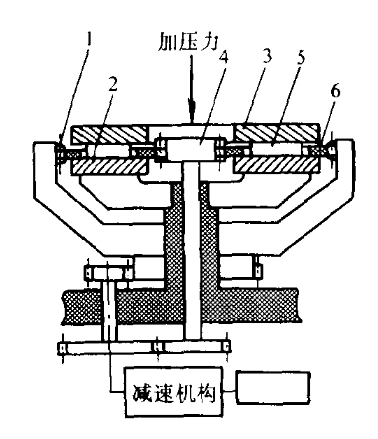
第三节　超精密平面研磨和抛光

某些平面研磨有着极高的要求，如制造大规模集成电路的硅片，不仅要求极高的平面度，极小的表面粗糙度值，而且要求表面无变质层、无划伤。研磨光学平晶、量块，石英振子基片，除要求极高平面度、极小表面粗糙度值外，还要求两端面严格平行。由于这些研磨抛光零件的极高质量要求，了解其研磨工艺规律，也就掌握了基本的研磨规律。

下面介绍一种使用超细磨料的软质研具进行平行平面的研磨。

一、精密平面的研磨机

精密平面研磨可以用单面研磨，也可以用双面研磨。进行高质量平行平面研磨时需使用双面研磨。图 7-3 所示是一种双面平面研磨机。研磨的工件放在工件保持架内，上下均有研磨盘。下研磨盘由电机通过减速机构带动旋转。为在工件上得到均匀不重复的研磨轨迹，工件保持架制成行星轮形式，外面和内齿轮啮合，里面和小齿轮啮合，如图 7-4a 所示。故工作时工件将同时有自转和公转，作行星运动。上研磨盘一般不转动（有时也转动），上面可加载并有一定的浮动以避免两研磨盘不平行造成工件两研磨面的不平行。



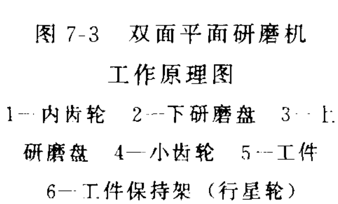
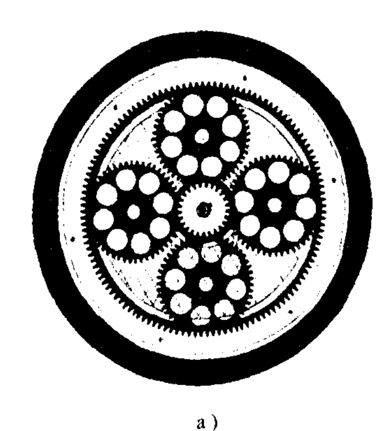
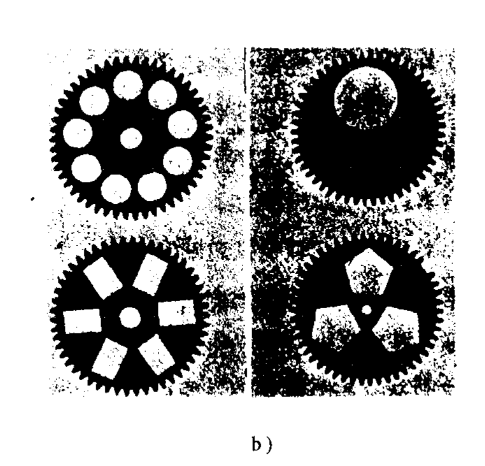


图 7-3 双面平面研磨机工作原理图

1—内齿轮 2—下研磨盘 3—上研磨盘 4—小齿轮 5—工件 6—工件保持架（行星轮）



a）



b）

图 7-4 工件保持架作成行星轮形式

a）工件保持架和内齿轮、小齿轮啮合

b）不同工件保持架形式

二、平面研磨使用的研具

在研磨、抛光中，通过研磨使研具的平面状态复映到工件上，这涉及到确保几何形状精度问题。特别是研磨端面小的高精度平面工件时要使用弹性变形小的研具，并从一开始就使用能保证平面度的研具。

作为这样抛光的研具，除用特种玻璃外，也可以用在加工成平面的金属板上涂一层四氟乙烯和镀铅和铟，都可以实现研磨与抛光，并能得到好的平面加工结果，但其缺点是薄的研具层寿命短。

为获得高的研磨表面质量，在工件材料较软时，在加工光学玻璃时，有时使用半软质研磨盘（如锡盘）和软质研磨盘（如沥青盘）。使用这种研磨盘最主要的问题是研磨盘不易保持平面度，因而影响加工件的平面度。使用软质研磨盘的优点是研磨出的表面变质层很小，表面粗糙度也很小。

三、平面研磨时的研磨运动轨迹和软质研具磨损变形

在以沥青为软质研具和以玻璃为工件的研磨中，为了研究理论上和实践上的研磨状态，研究了图 7-5 所示的圆盘状工件和圆环研具的关系。设两者的任意点（r_w，θ_w）、（r_p，θ_p）的加工量、研具的磨损量分别为 h_w、h_p，研磨时间 t 为 m，并假设产生在外半径为 r_w 内半径为 r_p 的环板上的轨迹密度是均匀的，且工件与研具的转速相同 $n_w=n_p=n$，全面适用于 $v=2\pi\cdot n\cdot C\cdot 10^{-6}$恒速条件。则：

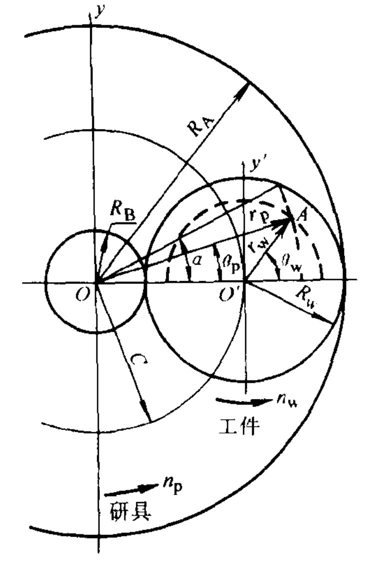


图 7-5 平面研磨时的运动关系

$$h_w=\sum_{1}^{m}(\Delta h_w)_m=\sum_{1}^{m}\eta_w\nu(p_w)_m\Delta t \tag{7-1}$$

$$h_p=\sum_{1}^{m}(\Delta h_p)_m=\sum_{1}^{m}\eta_p\nu(p_p)_m\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)\cdot\Delta t \tag{7-2}$$

$$\alpha = \cos\{(r_p^2 - R_w^2 + C^2)/2Cr_p\}$$

$$= \cos\{(r_w^2 - R_w^2 + 2C^2 + 2Cr_w\cos\theta_w)/2C\sqrt{r_w^2 + C^2 + 2C \cdot r_w\cos\theta_w}\} \quad (7\text{-}3)$$

式中 Δh_w——微小单位加工时间 Δt 内工件的加工量，单位为 μm；

Δh_p——微小单位加工时间 Δt 内研具的磨损量，单位为 μm；

η_w——工件的加工量与压力比，单位为 $\mu m \cdot km^{-1}/100kPa$；

η_p——研具的磨损量与压力比，单位为 $\mu m \cdot km^{-1}/100kPa$；

C——研具与工件的中心距，单位为 mm；

ν——相对速度，单位为 km/min；

α/π——研具在一转内与工件作用的接触比；

$(p_w)_m$——点 A 在工件上描述的轨迹上的分布压力 $(p)_m$ 的平均值，单位为 kPa；

$(p_p)_m$——点 A 在研具上描述的轨迹上的分布压力 $(p)_m$ 的平均值，单位为 kPa。

分布压力 $(p)_m$ 是附加在工件上的载荷 P_0 对应研具与工件的形状而分布的压力，分布压力 $(p)_m$ 与附加在工件上的载荷 P_0 之间的关系如图 7-6 所示，并假设满足如下条件：

1）工件是不变形的刚体，研具是能按工件加工面的形状变形的弹性体。这时可以忽略介于两者之间的磨粒与加工液的厚度而进行研磨，无论两者的形状怎样变化都能确保工件全面贴紧。

2）分布的压力 $(p)_m$ 取决于研具的弹性变形量。

3）研具的塑性变形也包含在磨损中。

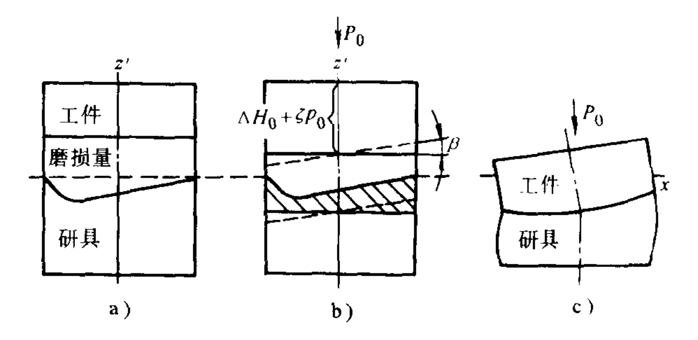


图 7-6 工件与软质研具的相互作用

由理想的平面所组成的研具与工件，在 Δt 的磨损、及压力分布的变化情况如图 7-6 所示。图 7-6a 表示开始时压力和恒定的相对速度在起作用，其磨损状态由式(7-1)、(7-2)得出。在研具的半径上，由于实际的作用时间不固定，所以研具不能维持平面。图 7-6b 是在图 7-6a 的磨损状态下加载载荷 P_0 时，使研具发生弹性变形的情况。当两者（工件与研具）的初始条件一给定，初始分布压力就以平均分布压力 $p_0(=P_0/\pi R_w^2 \times 10^{-2})$ 全面分布。在 Δt 后，两者的平均磨损量之和为 ΔH_0。根据前面的假设，从两者的重叠部分（用斜线表示的部分）可以导出分布压力。如果以图 7-5 中的 y' 轴为对称轴，使左右半圆上的压力总和均衡，仅将工件倾斜 β 角，就可得到正确的分布压力 $(p)_m$。因此，Δt 前后的分布压力是不同的，所以，结果成了图 7-6c 的接触状态。

分布压力可由下式求出：

$$\begin{aligned}(p)_m = & \frac{P_0}{\pi R_w^2} \times 10^2 + \frac{1}{\zeta}\left[(m-1)\left(\eta_w + \frac{R_w^2}{R_A^2 - R_B^2} \cdot \eta_p\right)\right. \\ & \left. \times \frac{P_0 v \Delta t}{\pi R_w^2} \times 10^2 - \left\{\sum_1^{m-1}(\Delta h_w)_m + \sum_1^{m-1}(\Delta h_p)_m\right\}\right] \\ & - \frac{8}{\zeta \pi R_w^4}\left[\sum_{n=1}^{2i}\left\{\sum_1^{m-1}(\Delta h_p)_m\right\} \cdot r \times \left[\frac{\sqrt{(2r \cdot C)^2 - (r^2 - R_w^2 + C^2)^2}}{2C}\right.\right. \\ & \left.\left. \times -C \cdot \cos^{-1}\{r^2 - R_w^2 + C^2)/2r \cdot C\}\frac{R_A - R_B}{2i}\right] \times (r_p\cos\theta_p - C)\right. \end{aligned} \quad (7\text{-}4)$$

$$r=R_B+\frac{(R_A-R_B)}{2i}\cdot\frac{(2n-1)}{2},n=1,2,\cdots,2i$$

式中 ζ 是研具的弹性变形常数。第 1 项是平均压力，第 2 项是有关两者磨损的压力，第 3 项是修正由研具半径方向的磨损偏差引起的偏斜 β 的修正项。

式(7-1)、(7-2)中的 $(p_w)_m$，$(p_p)_m$ 与分布压力 $(p)_m$ 之间有如下关系式

$$(p_w)_m=\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}(p)_m d\theta_w \tag{7-5}$$

$$(p_p)_m=\frac{1}{\alpha}\int_0^{\alpha}(p)_m d\theta_p \tag{7-6}$$

以上面的理论式为基础的数值计算结果如图 7-7 所示。工件与研具两者的任意点 A 处的加工量和研具磨损量，相对于两者的中心各自画圆弧与横轴相交，从交点出发每 20min 间隔与纵轴平行地上升或下降。若根据圆板工件与环形研具的组合，则与加工进行的同时，工件形成凸面，研具在半径上形成凹面。

图 7-8 所示出以 BK-7 玻璃为工件，氧化铈为磨料，沥青为研具进行研磨时的实验结果与理论计算结果相对应的情况。计算值与实验值非常一致，根据这一情况，可以制定出超精密研磨的条件。

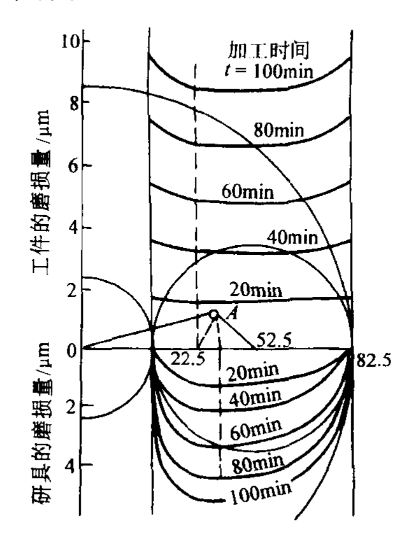


图 7-7 工件与研具的磨损量关系
试件 $\eta_w=1.60\mu m\cdot km^{-1}/kPa$
研具 $\eta_p=5.00\mu m\cdot km^{-1}/kPa$
$\zeta=0.4\mu m/kPa$
加工速度 $9.9\times10^{-3}km/min$
加工压力 5.4kPa，$\Delta t=5min$

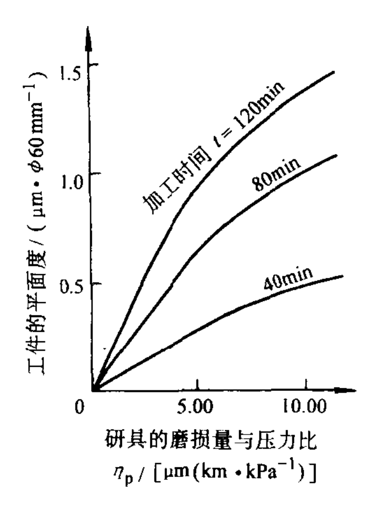


图 7-8 研具磨损量与压力比与工件平面度的关系
试件 $\eta_w=1.60\mu m\cdot km^{-1}/kPa$
研具 $\eta_p=5.00\mu m\cdot km^{-1}/kPa$
$\zeta=0.4\mu m/kPa$

图 7-8 和图 7-9 是计算所得到的研具磨损量与压力比 η_p 或研具的弹性变形常数 ζ 与工件平面度的关系。为了加工出高精度平面，采用 η_p 小的研具效果为好。但是，实际上不能忽视研具的磨损，因此对于研具来说，能够长期维持平面度的修正装置是必不可少的。

另外，使用 ζ 小的研具也能有效地控制平面度的恶化，但 ζ 太小时，压力偏差较大，反而易引起平面度的恶化。而当 ζ 较大时，只要加工量少，由于压力偏差较小，初始的平面度不会产生多大的恶化。

另外，如果研具磨损，就应该立即废弃。采用固定平面研磨法也能进行硅片的镜面研磨。对于弹性变形大的研具也有不使其平面度下降的条件，如图 7-10 所示。硅片的镜面研磨适宜用软质发泡聚氨基甲酸乙脂的人造革研具，很早以前，对玻璃等非球面用研磨和抛光来修整形状时，就采用涂有沥青（厚度 5～10mm）的容易弹性变形的橡胶海绵研具，这种方法可以保持形状精度。

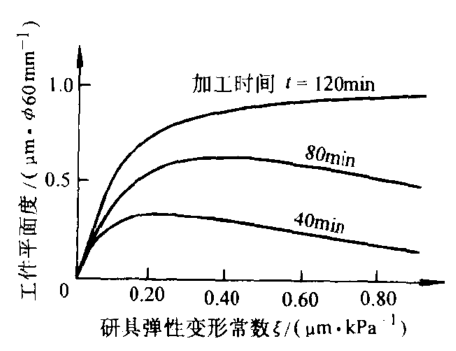


图 7-9 研具弹性变形常数和工件平面度关系

试件 $\eta_w=1.60\mu m \cdot km^{-1}/kPa$

研具 $\eta_p=5.00\mu m \cdot km^{-1}/kPa$

四、高平行度平面的研磨抛光

平行度的修正研磨是使被加工面对基准平面的角度达到最小值。单面研磨法通常是采用使工件附加偏心压力，所以必须在加工量与工件和研具的相对速度、压力和时间成正比的范围内进行研磨。

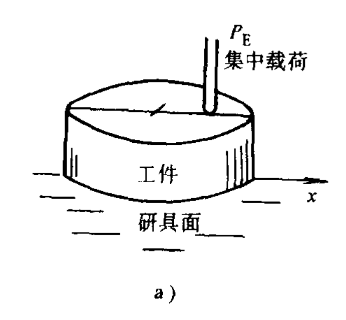
图 7-10 和图 7-11 分别表示以集中载荷和分散载荷形式施加偏心压力时的模型和压力分布。

假设圆盘工件的半径为 R_W，工件的自重为 P_W，偏心集中载荷为 P_E，其加载的位置距工件的中心点为 X_E，则在连结加载位置与中心的直线任意点 X 处发生的压力分布 $P(x)$，可由下式得出

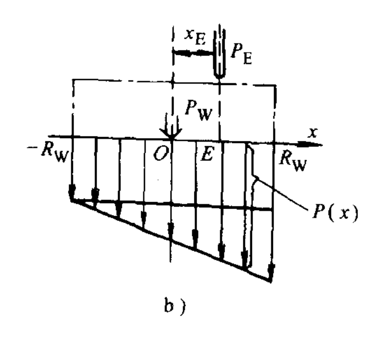
$$P(x)=\left\{\frac{P_W+P_E}{\pi R_W^2}+\frac{4P_E X_E X}{\pi R_W^4}\right\}10^2 \tag{7-7}$$

由于整个工件必须始终保持平面研磨，所以 $P(x)$ 经常是正的，因而必须选择满足下式的条件。

$$x_E\leqslant\frac{R_W}{4}+\frac{R_W \cdot P_W}{4P_E} \tag{7-8}$$



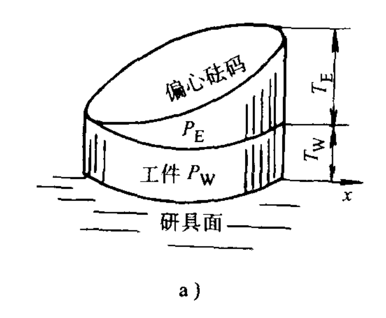
a)



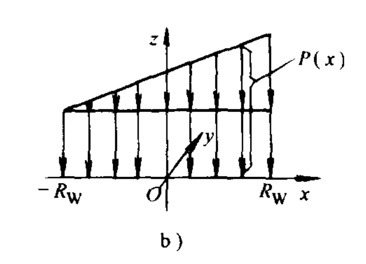
b)

图 7-10 附加偏心集中载荷的模型和压力分布

a）附加偏心集中载荷 b）加工压力分布



a)



b)

图 7-11 附加偏心砝码和压力分布

a）附加偏心砝码 b）加工压力分布

关于分散载荷，可以用偏心砝码置换。假设偏心砝码的最大高度为T_E，偏心砝码的偏心位置则是

$$(X_E, Y_E, Z_E) = (R_W/4, 0.5T_E/16) \tag{7-9}$$

因此将工件和偏心砝码的比重分别设定为P_W、P_E，则分散压力$P(x)$变为

$$P(x) = \left\{P_W \cdot T_W + \frac{P_E T_E}{2}\left(1 + \frac{X}{R_W}\right)\right\} \times 10^{-4} \tag{7-10}$$

使用偏心砝码进行研磨修正平面度的结果如图 7-12 所示。工件为ϕ100mm 的玻璃。研磨时使用三种砝码，A（P_E=0.30kg）、B（P_E=0.56kg）、C（P_E=1.05kg），每 180°改变一次位置，研磨最高部分并测量平行度的变化。

五、晶体方位误差的修正研磨

平行度的修正是以具体的几何平面作参照面消除不平行量的研磨加工。但是，晶体方位误差的修正加工是不能用肉眼确定的，而是以晶格面作参照面进行研磨的。晶体方位的测量，通用性较高的是采用 X 射线方法的测量，可以进行高精度的测量。

如果进行修正加工，使用图 7-13 的结构研磨修正夹具，就可以完全适应上述测量精度的研磨。

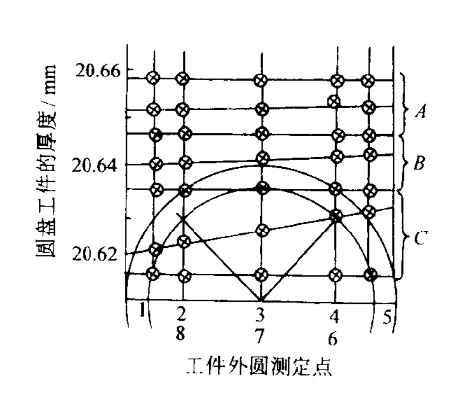


图 7-12 使用偏心砝码进行研磨修正平行度的效果

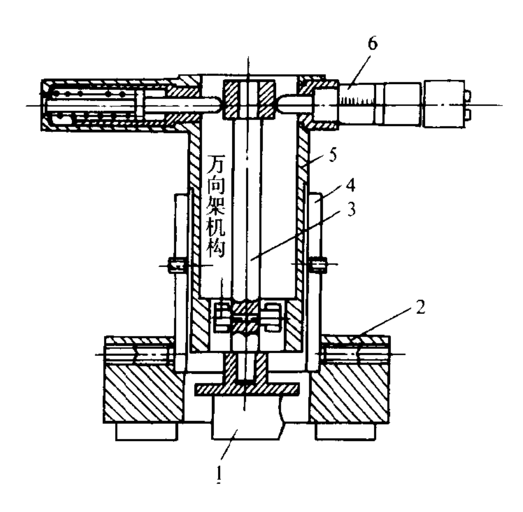


图 7-13 修正晶体方位误差的夹具结构
1—晶体 2—基座 3—中心轴 4—导管 5—滑管 6—测头

当修正更高精度的晶体方位误差时，可利用能以秒单位测量的高精度单色 X 射线晶体方位的测量装置。再按修正量偏压加载研磨法进行研磨，可以接近正确的晶体方位。对 15mm×30mm×1mm 的水晶 Y 盘 200 块的晶体方位误差进行修正研磨时，每 20s 对误差进行一次分类，将同一类的误差方向统一，粘结在加工夹具内进行偏心加载研磨。图 7-14 所示修正加工后结果，最初有 14′左右的误差，修正加工后 1′以内为 98%，20″以内为 68%。

六、获得高质量平面研磨抛光的工艺规律小结

1）研磨运动轨迹应能达到研磨痕迹均匀分布并且不重叠。这主要由研磨机的行星运动达到。

2）硬质研磨盘在精研修形后，可以获得平面度很高的研磨表面，但要求很严格的工艺条件。硬质研磨盘要求材质极均匀，并有微孔容纳微粉磨料。

3）软质（半软质）研磨盘易获得表面粗糙度值极小和表面变质层甚小的研磨抛光表面，但不易获得很高的平面度。

4）使用金刚石微粉等超硬磨料可以获得很高的研磨抛光效率。在最后精研硅片、光学玻璃和石英晶体片时，使用 SiO_2、氧化铈微粉和软质研磨盘容易得到表面变质层和表面粗糙度值极小的优质表面，但不易获得很高的平面度。

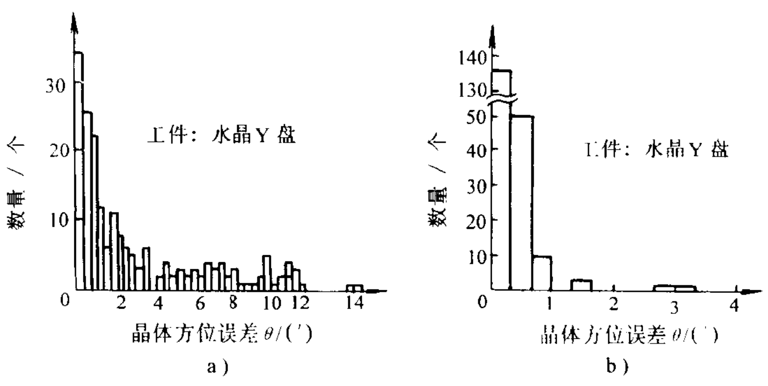


图 7-14　晶片的结晶方位误差的修正结果

a）双面研磨层的晶体方位误差　b）修正加工后的晶体方位误差

5）研磨平行度要求很高的零件时，可采用：(1) 上研磨盘浮动以消除上下研磨盘不平行误差；(2) 小研磨零件实行定期180°方位对换研磨，以消除因研磨零件厚度不等造成上研磨盘倾斜而研磨表面不平行；(3) 对各晶向硬质不等的晶片研磨时，加偏心载荷修正不平行度。

6）为提高研磨抛光的效率和研磨表面质量，可以在研磨剂中加入一定量的化学活性物质，实践证明这是极有效的。

7）高质量研磨时必须避免粗的磨粒混入，空气中的灰尘混入，否则将使研磨表面划伤，达不到高质量研磨要求。

第四节　采用新工作原理的超精密研磨抛光

一、新工作原理的研磨抛光方法

传统的研磨抛光方法是完全靠微细磨粒的机械作用去除被研磨面的材质，达到很高的加工表面。磨粒和切屑越细及机械去除作用越小，获得的研磨表面质量越高。

最近出现不少新的研磨抛光方法，其工作原理有些已不完全是纯机械的去除，有些用的不是传统的研具，传统的研磨磨料。这些新的研磨方法有的可以达到分子级和原子级材料的去除，并达到相应的极高几何精度和无缺陷无变质层的研磨表面。

表 7-2 中给出了不同的超精密研磨抛光方法，有传统的方法，也有新工作原理的研磨抛光方法。

表 7-2　各种超精密研磨抛光方法

加工法	磨　粒	研　具	加工液	加工机械、方式	加工机理	应用示例
超精密研磨	微细磨粒	铸铁	煤油 机油	双面研磨机 手工研磨	以磨粒的机械作用为中心	量具 量规端面
超精密抛光	微细磨粒 容易微细化的磨粒 软质磨粒	软质研具 有槽	过滤水 蒸馏水 净化水	透镜研磨机 修正轮型加工机 加压运动稳定性	以磨粒的机械作用为中心	载物台 光学元件 振动子基板 玻璃板

（续）

加工法	磨　粒	研　具	加工液	加工机械、方式	加工机理	应用示例
液中研磨	微细磨粒	合成树脂板	过滤水 蒸馏水 净化水	透镜研磨材料 液中浸渍	以磨粒的机械作用为中心 由加工液进行磨粒分，起缓冲冷却效果	硅片
机械·化学抛光	微细磨粒	人造革	湿式	高速高压运转	通过机械化学去除反应生成物	硅片
	软质磨粒	玻璃板	干式			蓝宝石片
化学机械抛光	微细磨粒	软质研具	碱性液 酸性液	修正轮形加工机 双面研磨机	磨粒的机械作用和加工液的腐蚀作用	
弹性发射加工 非固体接触加工 悬浮抛光	微细磨粒-（粗磨粒）	使工件悬浮的动压研具 硬质材料	洁净水 碱性液	加工时通过动压使工件—工具呈非接触状态的结构	由于磨粒的冲撞引起微量弹性破坏 破碎的磨粒与试件的原子、分子的相互作用 加工液的腐蚀作用	硅片 玻璃
液面抛光	不使用磨粒	软质研具	Br-甲醇（甘醇20%）	保证工件与研具非接触状态的结构	利用加液的腐蚀作用	GaAs 晶片 InP 晶片

二、液中研磨

液中研磨法是将超精密抛光的研磨操作浸入在含磨粒的研磨剂中进行，在非常充足的加工液中，借助水波效果，利用浮游的细小磨粒进行研磨加工，并对磨粒作用部分所产生的热还有极好的冷却效果，对研磨时的微小冲击也有缓冲效果。利用微细的 Al_2O_3 磨粒和聚氨酯研具研磨硅片时，可以得到完全高质量的镜面。

三、机械化学研磨

机械化学研磨，其加工机理是利用化学反应进行机械研磨。有湿式和干式两种研磨方法。

湿式条件下的机械化学研磨，承担硅片的最终精加工，加工质量、加工精度和加工的经济性等都令人满意。研磨剂是使用含有 0.01μm 大小的 SiO_2 磨粒的弱碱性胶状水溶液。而作为与它相配合的研具，是使用表层由微细结构的软质发泡聚氨基甲酸涂敷的人造革。

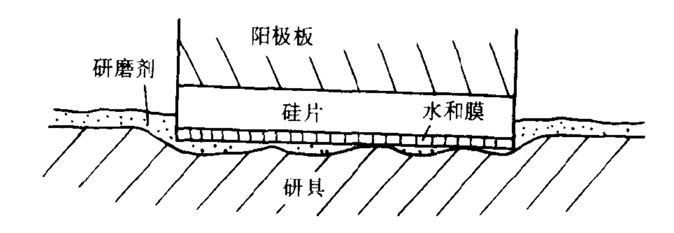


图 7-15　硅片的机械化学研磨

研磨状态如图 7-15 所示，由于硅片的直径大，人造革的研具又是没有网眼而平坦的，所以借助研磨剂使两者对研时，在高速高压的研磨条件下，两者之间可形成研磨剂层。人造革研具面有微小的凸凹，虽然有可能部分粘有硅粉末，但在两者间研磨剂呈封闭状态，而且研磨过程中，硅片表面上形成软质水膜。另一方面被水膜掩盖的硅表面，不是直接受到研具的机械作用，而是通过水和膜进行加工的，所以能进行良好的研磨。

但是，实际加工，并不完全像上述情况那样，有时水和膜破裂，硅片表面会生成加工缺

陷。但是，这种缺陷可以通过清洗和用去除自然氧化膜的水溶液浸蚀来获得无任何缺陷的加工表面。根据对硅片进行热氧化感应层错检查的结果来看，也是如此，热氧化感应层错检查是将硅片放在有氧和1200℃水蒸气环境中，经1～2h的氧化。使极微小的加工缺陷再排列。再用腐蚀液检测并数值化表示。提高研磨压力或减少加工液的供给量，缺陷就增多。当加大研磨速度，由于水面漂浮现象，研磨剂层变厚，缺陷就减少了。

最近，为了经济地进行硅片的研磨，有时将传统的机械化学抛光进行二次抛光。在一次抛光中，用磨粒和研具的机械作用破坏水膜，使它们直接作用于硅片来提高加工效率，为此，要使用大粒度的磨粒和通气性能好的所谓研磨剂层变薄的研具。

干式条件下的机械化学抛光，是利用工件与磨粒之间生成化学反应的研磨方法。用撒有软质SiO_2磨粒的玻璃板研磨蓝宝石时，在蓝宝石表面上形成与SiO_2磨粒的反应物软质莫来石，它容易剥离而能获得高质量的镜面。在干式条件下微小范围的化学反应有利于加工的进行，由于0.01～0.02μm微小的SiO_2磨粒有较强的化学活性所以能显现出研磨量增多，比使用1μm的金刚石粉的研磨量还大。

在这种情况下，研磨面上也不发生划伤，即便用热磷酸（300℃）浸蚀，也不会出现坑点而获得良好的镜面。另外，由于是使用玻璃研具，研磨中研具几乎是没有弹性变形，且在外圆周边也没有塌边，这就是这种研磨法的特点。

四、化学机械抛光

这是一种利用研磨液腐蚀作用和磨粒机械作用的双重作用的研磨方法。

在利用磨粒和有腐蚀效果的研磨液的研磨中，有使用氧化铁和硫酸或盐酸的水溶液，也有使用Mn-Zn铁淦氧、Al_2O_3磨粒和盐酸水溶液研磨钆、镓、石榴石基板的实例，其目的都是为提高加工效率和加工质量。

不使用磨粒而只利用具有腐蚀效果的加工液进行摩擦抛光的研磨，更适合化合物半导体晶片的加工。对于GaAs晶片，使用$NaClO_3$水溶液或溴甲醇和人造革研具，可以进行几乎无加工缺陷的镜面研磨。

五、无损伤表面的研磨抛光技术

在电子工业领域，以大规模集成电路为主的电子元件所用的材料，品种极多、用途广泛。有以硅为代表的半导体，有用作磁头的铁氧体等磁性体，有CdS、ZnO、$LiTaO_3$、蓝宝石（α-Al_2O_3）等的压电体、电介体以及YAG、$Gd_3Ga_5O_{12}$等光学用的晶体。

为了充分发挥上述各种硬脆材料制成的电子、光学元件的性能，首要的任务是进行无加工变质层、无表面损伤（不破坏结晶的原子排列）的镜面超精密抛光。

下面介绍无损伤表面加工的基本原理，开发的利用悬浮微细粒子的胶态二氧化硅进行无损伤表面的镜面抛光技术。

1．无损伤表面抛光的加工机理

晶体材料的无损伤表面抛光技术，原理上是以不破坏表面层的原子排列，即以不破坏极表层结晶结构的加工单位进行材料切除加工。这种加工方法可分为以下几种：

1）机械化学复合加工；

2）机械微量去除加工；

3）化学腐蚀加工。

机械化学复合加工中施加机械能作用，引起晶体表面发生物理化学变化，产生固相反应

的机械化学抛光，也有在机械作用同时再施加化学作用，借助加工时摩擦热的局部应力应变由加工液促进化学作用的湿式机械化学抛光。

机械微量去除，只限定于磨粒作用的机械抛光。另外还有一种，是使微细粒子与工件表面发生冲撞以原子级单位去除材料的弹性发射加工（E-EM）。

作为无损伤表面的加工法，还有一种就是传统使用的化学研磨法，即化学腐蚀加工。但是，由于使用这种方法，工件表面上的凹凸较大，需要软质抛光盘上用化学液进行研磨即所谓盘式化学研磨。用这种方法，加工效率和表面形状都不太好。只适用于加工 GaAs 单晶。

表 7-3 列出无损伤表面加工方法的作用、原理及其应用实例。

表 7-3　无损伤表面加工的原理、作用和应用实例

类别	加工原理和作用					无损伤表面化			应用实例
	加工原理			促进加工因素	加工因素	磨粒	研具	加工液	
机械化学抛光	机械作用 + 化学作用	干式	利用与磨粒的固相反应	磨粒作用点产生的高温高压 磨粒本身的表面活性	与结晶的固相反应范围温度 磨粒的硬度 磨粒的粒径 表面能量 其它物质对磨粒的吸附性	微细磨粒、软质	硬质		用 SiO_2 磨粒进行蓝宝石单晶加工
		湿式	利用与加工液的固液相反应	加工面的温度上升	晶体和磨粒及研具的摩擦系数 加工液的搅拌和粘度 晶体的磨痕、切削、破碎 新生面的吸附	微细磨粒、软质	软质	晶体腐蚀液	由碱溶液进行单晶硅的加工 由酸性溶液进行 GGG 单晶的加工 由酸溶液进行铁氧体加工
				晶体的活性化	晶体晶格的歪斜、无定型化 表面产生的晶格缺陷和活性点 由外激电子发射的活性化				
抛光	机械作用	湿式	利用超微细磨粒的机械去除作用	磨粒作用的深度 磨粒的保持力	磨粒的粒径、硬度 粒径分布 参加作用的磨粒数量 加工液的粘度 研具的构造、硬度	超微细磨粒软质	软质	水	由氧化铁加工 $LiTaO_3$ 单晶 弹性发射加工法 非接触加工方法
盘式化学研磨	化学作用 + 机械作用	湿式	利用加工液（腐蚀液）的溶蚀作用	加工表面温度上升 搅拌加工液	与研具的摩擦热 搅拌		软质	晶体腐蚀液	GaAs 的盘式化学研磨

上述机械化学研磨或盘式化学研磨的效果都取决于晶体、磨粒和加工液等的化学性质.相反，机械微量去除加工，则是取决于晶体和磨粒的硬度，磨粒的形状，研具保持加工剂的性能等的物理特性。

2. 胶态二氧化硅的研磨

胶态二氧化硅，如表 7-4 所示，是将粒径 100～200Å 的 SiO_2 超微细粒子悬浮于碱性溶液（pH9.5～10.5）中（占重量 30%），其含碱量相当于 NaOHlg/L 和 Na_2O_37g/L。根据电子显微镜观察，SiO_2 微细粒子为圆球状。

表 7-4 胶态二氧化硅的成分和特性

SiO_2 含量	占总量 30%
Na_2O 含量	0.6%
氢离子浓度（pH）	9.5～10.5
粒径	0.01～0.02μm
粘度（20℃）	50CP 以下
比重（20℃）	1.14～1.24
外观	透明的乳白色胶液
结冰点	0℃
稳定性	半永久的

3. 胶态二氧化硅研磨机理

使用胶态二氧化硅进行研磨时，首先要弄清是否有机械化学作用。如果组成胶态二氧化硅的 SiO_2 微细粒子是基于碱性液体的化学作用，则叫作湿式机械化学研磨，可以加工的晶体材料是有限的。如果是没有化学作用而基于 SiO_2 微细粒的机械微量去除作用，则可以加工的晶体材料种类较多。现以单晶蓝宝石为试件，进行胶态二氧化硅研磨，来明确是基于化学作用还是基于机械作用的研磨。

图 7-16 是将金刚石粉（磨粒）分别分散在净水和碱性溶液中制成研磨剂，研磨蓝宝石。添加碱，则加工速度反而降低，对蓝宝石来说，看不出碱对加工量的促进作用。事实上，如果用碱性溶液，例如 200℃的 NaOH 溶液（重量约 53%）进行腐蚀加工，加工速度至多为 0.008μm/h。

至于湿式研磨时，SiO_2 微细粒子对蓝宝石是否有化学作用，图 7-17 所示的情况可以说明。使用 0.016μm（160Å）SiO_2 磨粒时，湿式研磨与干式研磨相比，加工速度比为 1/18 以下。因为在水中，磨粒（SiO_2 微细粒子）作用局部温度的上升不象干式那样快。另外，还由于水的吸附作用，SiO_2 微细粒子的表面活性也非常低。利用粒径 0.016μm 和更细的 SiO_2 磨粒进行干式研磨时，其加工速度相当于用粒径大 60 倍的 1μm 的 SiO_2 加工时的 4 倍。这是因为 0.016μmSiO_2 微细粒子，在干燥状态时，粒子本身的表面活性很高且富有反应活性。

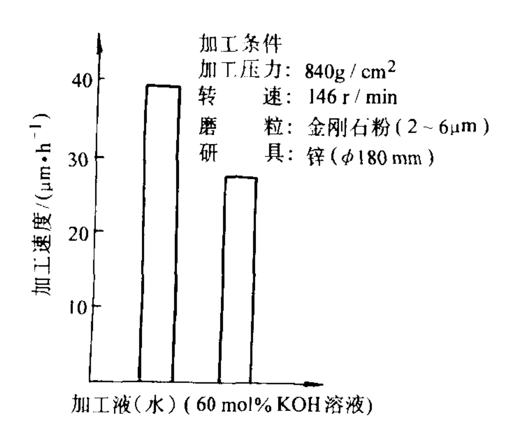


图 7-16 湿式研磨时碱性溶液对单晶蓝宝石的影响

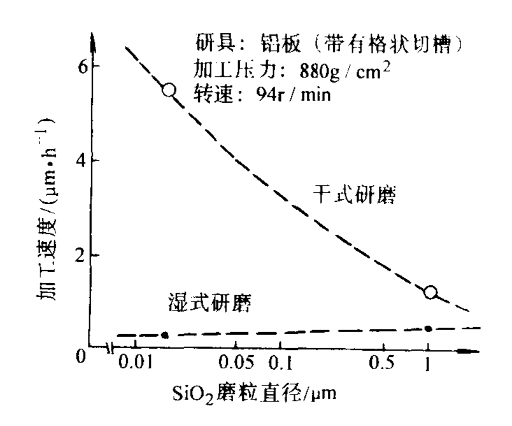


图 7-17 干式和湿式研磨时 SiO_2 磨粒粒径与加工速度的关系

另外，用 SiO_2 微细粒子干式和用胶态二氧化硅湿式分别对蓝宝石进行研磨，并用离子探针分析仪（IMA）分析其加工面，测量 Al 和 Si 的离子的强度，显示出两者之间有很大的差别。图 7-18 是比较两种研磨法的加工面（深度约 100Å 左右）上 Al^+ 和 Si^+ 的峰高实例。当量原子数比 Si^-/Al^- 而进行比较时，则干式研磨面的 Si^- 浓度是湿式研磨面的 6 倍。

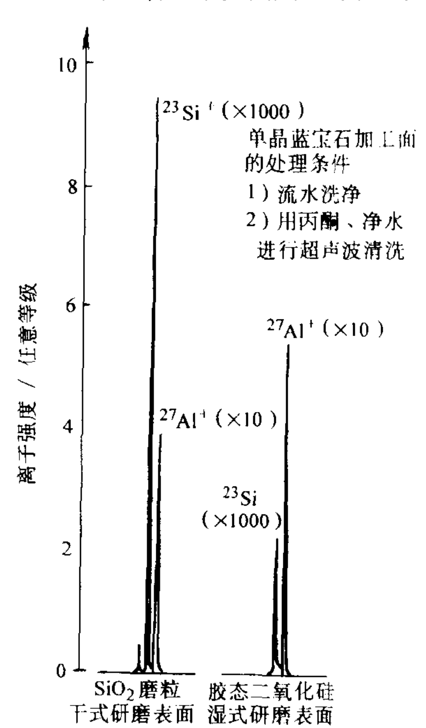


图 7-18　以离子探针分析 SiO_2 磨粒干式研磨和湿式研磨单晶蓝宝石加工表面结果

从上述例子，可以看出在干式研磨中，SiO_2 微细粒子的化学作用，促进了加工。相反，湿式研磨，由于达不到固相反应的相互扩散温度，所以化学作用小。换句话说，作为胶态二氧化硅湿式研磨单晶蓝宝石的加工机理，主要是机械性去除作用。

因此，胶态二氧化硅的研磨法可用于不同种类晶体材料的镜面加工。

4．胶态二氧化硅的研磨效率

用胶态二氧化硅对极硬的高品位单晶蓝宝石进行研磨加工时，如使用粒径 100～200Å 的 SiO_2 超微细粒子和软质弹性研具（人造革的），则不能看作只是由微细粒子的机械去除作用进行加工。

因为富有弹性的软质人造革研具有保持加工剂的性能和与晶体的粘合能力，在高压下，介于研具和晶体之间的胶态二氧化硅变成边界润滑的薄膜状态。在摩擦热和高压下，这极薄的膜状胶态二氧化硅受到强大的剪切应力时，则产生暂时性的可逆凝胶化现象（亦叫雷诺耳现象），因此，SiO_2 微细粒子的保持效果增大。其 SiO_2 微细粒子外表上变成固体状。利用其极微量的机械去除作用，使工件得到无破坏层的加工。

根据上述结果，通过变化胶态二氧化硅的凝胶化速度，可以增减对晶体的加工速度。

为了提高加工效率，除了考虑加工性之外，采用提高凝胶化速度的方法也可以。适当降低凝胶化速度，特别是对软质晶体研磨时，可以防止发生微小的划痕。

复习思考题

7-1　试述研磨加工的机理和特点。

7-2　试述抛光加工的机理和特点。

7-3　试述研磨抛光时加工表面产生变质层的机理和减少变质层的办法。

7-4　精密研磨、抛光时主要工艺因素有哪些？

7-5　研磨精密平面时，应使用怎样的研磨机床和研具？应有怎样的研磨运动？

7-6　要获得高平行度平面，应如何进行研磨抛光？

7-7　简述液中研磨。

7-8　简述机械化学研磨。

7-9　简述化学机械抛光。

7-10　简述无损伤表面的研磨抛光技术。

7-11　简述胶态二氧化硅的研磨方法。

第八章　微细加工技术

第一节　微细加工技术的出现

一、制造技术自身微细加工的极限

当今，现代制造技术的发展有两大趋势，一是向着自动化、柔性化、集成化、智能化等方向发展，使制造技术形成一个系统，进行设计、工艺和生产管理的集成，统称为制造系统自动化；另一是寻求固有制造技术自身微细加工的极限，也就是说，在现代制造技术中，能够加工零件的微小尺寸极限是多少，所以微细加工技术是指制造微小尺寸零件的加工技术。

精密加工和微细加工是有着密切联系的，它们都是现代制造技术的前沿，微细加工是属于精密加工范畴内的。现代制造技术的发展很快，不仅出现了微细加工技术，而且出现了超微细加工技术，所谓超微细加工技术就是指制造超微小尺寸零件的加工技术。

二、微细加工出现的历史背景

1. 精密机械仪器仪表零件的微细加工

科学技术的发展使设备不断趋于微型化，以适应工业、国防和社会生活的需要。现代的钟表、计量仪器、医疗器械、液压、气压元件、陀螺仪、光学仪器、家用电器等都在力求缩小体积、减轻重量、降低功耗、提高稳定性。特别是航空航天事业的发展，宇航工业的崛起，对许多设备、装置提出了微型化的要求，因此出现了许多微小尺寸零件的加工。例如：红宝石（微孔）轴承、微型齿轮、微型轴、金刚石针、微型非球面透镜、金刚石压头、金刚石车刀、微型钻头等都需要用微细加工方法来制造，微细加工越来越受到广泛应用。

现代科学技术的发展，已经形成了一门新兴的学科，即微小机械学，利用微细加工所制造的微小机械，已用于医疗、生物工程中，有着广阔的应用前景。图8-1所示为放大了600倍的利用微细加工手段所制造的微型电动机，其轴径为0.1mm，利用静电回转，转速1200r/min。图8-2为放大了300倍的微型齿轮，其外径为125μm。典型的微小机械有微型电动机、微型泵、各种微型传感器，如测量血压、血液中的PH值等。

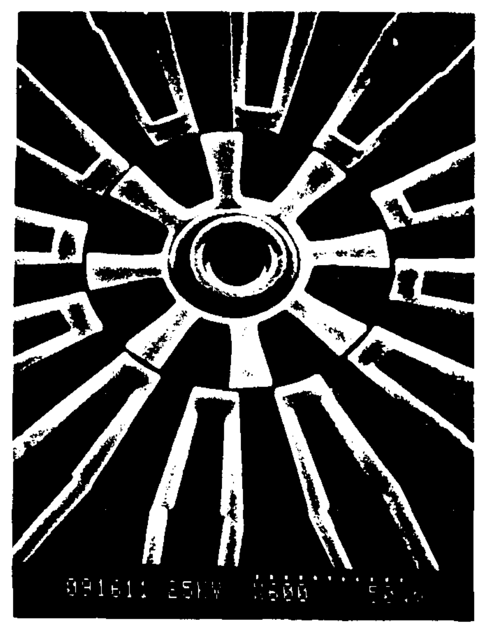


图8-1　微型电动机

2. 电子设备微型化和集成化的需求

计算机技术、微电子技术和航空航天等技术的发展，对电子设备微型化和集成化的需求就越来越高。同时，各种电子设备已广泛在工业、农业、交通运输、国防以及家庭等各个方面使用，其功能日益完善，结构愈益复杂，要求体积小、重量轻、成本低、可靠性高，这只有通过微型化和集成化才能实现。

电子设备微型化和集成化的关键技术之一是微细加工。微细加工不仅包含了传统的机械加工方法，而且包含了许多特种加工方法，如电子束加工、离子束加工、化学加工等；同时加工的概念不仅包含分离加工，而且包括了结合加工和变形加工等。

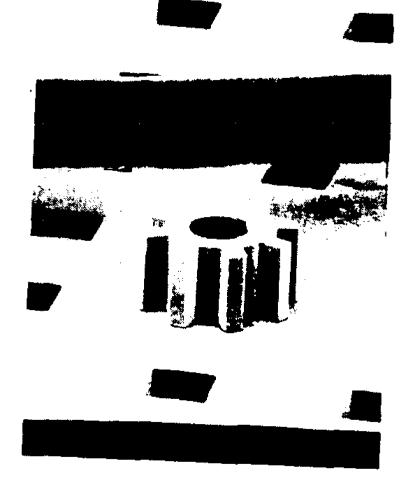


图 8-2　微型齿轮

3. 大规模集成电路的制作技术

大规模集成电路是电子设备微型化和集成化中的重要元件，微细加工技术的出现和发展与大规模集成电路有密切关系，与大规模集成电路有关的微细加工技术主要有外延生长、氧化、光刻、选择扩散和真空镀膜等。

外延生长（图 8-3a）是在半导体晶片表面沿原来的晶体结构轴方向上生长一薄层单晶层，以提高晶体管的性能，外延层厚度一般在 10μm 以内，其电阻率与厚度由所制作的晶体管性能决定。外延生长的常用方法是气相法（化学气相沉积）。

氧化（图 8-3b）是在半导体晶片表面生成氧化膜，这种氧化物薄膜与半导体晶片附着紧密，是良好的绝缘体，可作为绝缘层防止短路和电容的绝缘介质。常用的是热氧化法工艺。

光刻（图 8-3c）是在基片表面上涂覆一层光致抗蚀剂，经图形复印曝光、显影、刻蚀等处理后，在基片上形成所需精细图形。

基片经氧化、光刻处理后，置于惰性气体或真空中加热，并与合适的杂质（如硼、磷等）接触，则在光刻中去除了氧化膜的基片表面则受到杂质扩散，形成扩散层，这种微细加工称之为选择扩散（图 8-3d）。扩散层的性质和深度取决于杂质种类、气体流量、扩散时间、扩散温度等因素，扩散层深度一般为 1～3μm。

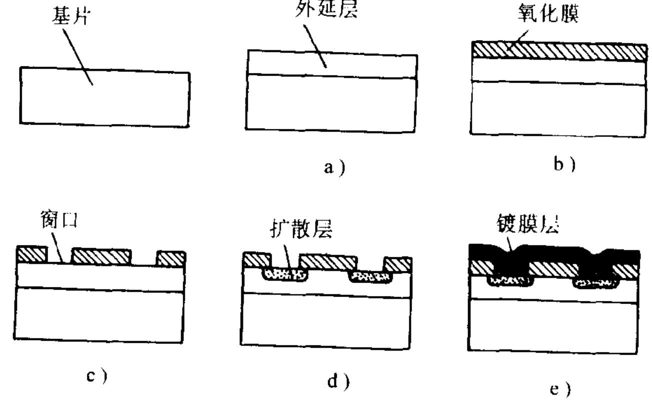


图 8-3　集成电路中有关微细加工方法
a）外延生长　b）氧化　c）光刻
d）选择扩散　e）真空镀膜

真空镀膜（图 8-3e）是在真空容器中加热导电性能良好的金属（如金、银、铂等）使之成为蒸气原子而飞溅到基片表面，沉积形成一薄层金属膜，从而解决集成电路中的布线和引线制作。

图 8-3 是上述几种微细加工技术的示意图。

集成电路一般是按集成度与最小线条宽度来分类，集成度是指在规定大小的一块单元芯片上所包含的电子元件数。集成电路要求在微小面积的半导体材料上能容纳更多的电子元件，以形成功能复杂而又完善的电路。电路微细图案中的最小线条宽度是提高集成度的关键技术，同时也是集成电路水平的一个标志，表 8-1 表示了各类集成电路的集成度和最小线条宽度，线宽愈小，对微细加工的要求就愈高，微细加工的难度愈大。大规模集成电路的制造要采用微细加工技术，而超大规模集成电路的制造要采用超微细加工技术。图 8-4 为集成电路制作流程

图，其制作过程中采用了各种精密加工方法、超精密加工方法、微细加工方法和超微细加工方法。

表 8-1　各类集成电路的集成度与最小线条宽度

分类 ＼ 参数与性能	单元芯片上的单元逻辑门电路数	单元芯片上的电子元件数	最小线条宽度/μm
小规模集成电路（SSI）	<10～12	<100	≤8
中规模集成电路（MSI）	12～≤100	100～<1000	≤6
大规模集成电路（LSI）	>100～<10^4	1000～<10^5	6～3
超大规模集成电路（VLSI）	≥10^4	≥10^5	2.5～≤0.1

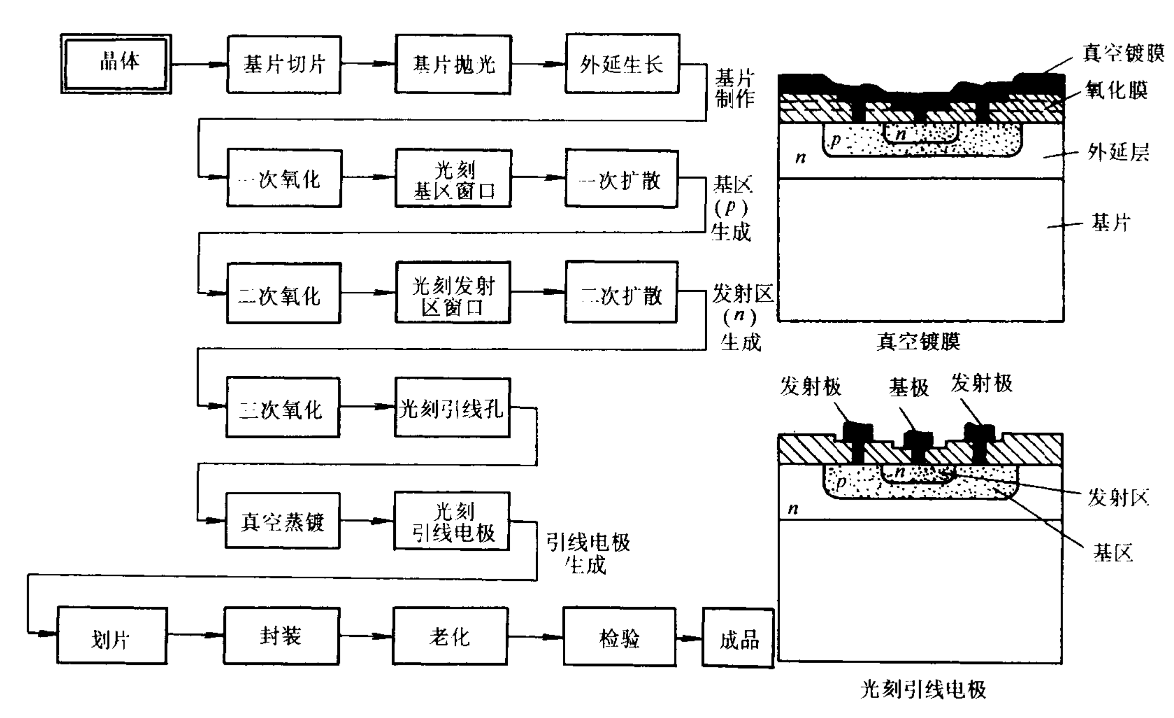


图 8-4　集成电路制作流程图

第二节　微细加工的概念及其特点

一、微细加工的概念

微细加工技术是指制造微小尺寸零件的生产加工技术。从广义的角度来说，微细加工包含了各种传统精密加工方法和与传统精密加工方法完全不同的新方法，如切削加工、磨料加工、电火花加工、电解加工、化学加工、超声波加工、微波加工、等离子体加工、外延生长、激光加工、电子束加工、离子束加工、光刻加工、电铸加工等。从狭义的角度来说，微细加工主要是指半导体集成电路制造技术，因为微细加工和超微细加工是在半导体集成电路制造技术的基础上形成并发展的，它们是大规模集成电路和计算机技术的技术基础，是信息时代、微电子时代、光电子时代的关键技术之一。因此，其加工方法多偏重于指集成电路制造中的一些工艺，如化学气相沉积、热氧化、光刻、离子束溅射、真空蒸镀以及整体微细加工技术。

整体微细加工技术是指用各种微细加工方法在集成电路基片上制造出各种微型运动机械，即微型机械和微型机电系统。

微小尺寸加工和一般尺寸加工是不同的，其不同点主要表现在以下几方面。

1. 精度的表示方法

一般尺寸加工时，精度是用其加工误差与加工尺寸的比值（即精度比率）来表示的，如现行的公差标准中，公差单位是计算标准公差的基本单位，它是基本尺寸的函数，基本尺寸愈大，公差单位也愈大，因此，属于同一公差等级的公差，对不同的基本尺寸，其数值就不同，但认为具有同等的精确程度，所以公差等级就是确定尺寸精确程度的等级。

在微细加工时，由于加工尺寸很小，精度就必须用尺寸的绝对值来表示，即用去除的一块材料的大小来表示，从而引入加工单位尺寸（简称加工单位）的概念，加工单位就是去除的一块材料的大小。所以，当微细加工 0.01mm 尺寸零件时，必须采用微米加工单位进行加工；当微细加工微米尺寸零件时，必须采用亚微米加工单位来进行加工，现今的超微细加工已采用纳米加工单位。

2. 微观机理

以切削加工为例，从工件的角度来看，一般尺寸加工和微细加工的最大差别是切屑大小不同。一般加工时，由于工件较大，允许的吃刀量 a_s 就比较大。在微细加工时，从强度和刚度上都不允许有大的吃刀量，因此切屑很小。当吃刀量小于材料晶粒直径时，切削就得在晶粒内进行，这时晶粒就作为一个一个的不连续体来进行切削。一般金属材料是由微细的晶粒组成，晶粒直径为数微米到数百微米。一般切削时，吃刀量较大，可以忽视晶粒本身大小而作为一个连续体来看待，因此可见一般加工和微细加工的微观机理是不同的。

3. 加工特征

一般加工时多以尺寸、形状、位置精度为加工特征，在精密加工和超精密加工时也是如此，所采用的加工方法偏重于能够形成工件的一定形状和尺寸。微细加工和超微细加工却以分离或结合原子、分子为加工对象，以电子束、离子束、激光束三束加工为基础，采用沉积、刻蚀、溅射、蒸镀等手段进行各种处理。这是因为它们各自所加工的对象不同而造成的。

二、微细加工的特点

随着半导体器件、金属印刷电路、微型机械、光通讯和集成电路技术的发展，对更加精细图形和更高精度尺寸、形状加工要求愈加强烈，使微细加工和超微细加工不断发展，成为精密加工领域中的一个极重要的关键技术，当前有如下几个特点。

1. 微细加工和超微细加工是一个多学科的制造系统工程

微细加工和超微细加工与精密加工和超精密加工一样，已不再是一种孤立的加工方法和单纯的工艺过程，它涉及超微量分离、结合技术、高质量的材料、高稳定性和高净化的加工环境、高精度的计量测试技术以及高可靠性的工况监控和质量控制等。

2. 微细加工和超微细加工是一门多学科的综合高新技术

微细加工和超微细加工技术的涉及面极广，其加工方法包括分离、结合、变形三大类，遍及传统加工工艺和非传统加工工艺范围。

3. 平面工艺是微细加工的工艺基础

平面工艺是制作半导体基片、电子元件和电子线路及其连线、封装等一整套制造工艺技术，它主要围绕集成电路的制作，现已在发展立体工艺技术。

4. 微细加工和超微细加工与自动化技术联系紧密

为了保证加工质量及其稳定性，必须采用自动化技术来进行加工。

5. 微细加工技术和精密加工技术的互补

微细加工属于精密加工范畴，但其自身特点十分显著，两者相互渗透，相互补充。

6. 微细加工检测一体化

微细加工的检验、测试的配置十分重要，没有相应的检验、测试手段是不行的，在位检测和在线检测的研究是非常必要的。

第三节　微细加工机理

一、微切削去除机理

微细切削去除时，为保证工件尺寸精度要求，其最后一次的表面切除层厚度必须小于尺寸精度值。同时，由于工件尺寸小，从材料的强度和刚度上考虑，切屑必须很小，因此吃刀量可能小于材料的晶粒大小，切削就在晶粒内进行，这时称之为微切削去除。

1. 切削厚度材料剪切应力的关系

在微切削去除时，切削往往在晶粒内进行，因此，切削力一定要超过晶体内部的分子、原子结合力，其单位面积的切削阻力（N/mm^2）将急剧增大，这样一来，刀刃上所承受的剪切应力就急速地增加并变得非常大，从而在单位面积上会产生很大的热量，使刀刃尖端局部区域的温度极高，因此要求采用耐热性高、高温硬度高、耐磨性强、高温强度好的刀刃材料，即超高硬度材料，最常用的是金刚石等。

2. 材料缺陷分布的影响

材料微观缺陷分布或材质不均匀性，可以归纳为以下几种情况：

1）晶格原子（$\sim10^{-6}$mm）　在晶格原子空间的破坏就是把原子一个一个地去除。

2）点缺陷（$10^{-6}\sim10^{-4}$mm）　点缺陷就是在晶粒结构中存在着空位和填隙原子。点缺陷空间的破坏就是以点缺陷为起点来增加晶格缺陷的破坏。晶体中存在的杂质原子也是一种点缺陷。

3）位错缺陷（$10^{-4}\sim10^{-2}$mm）　位错缺陷就是晶格位移和微裂纹，它在晶体中呈连续的线状分布，故又称为线缺陷。位错就是有一列或若干列原子发生了有规律的错排现象。位错缺陷空间的破坏是通过位错线的滑移或微裂纹引起晶体内的滑移变形。在晶体内部，一般情况下大约 1μm 左右的间隔内就有一个位错缺陷。

4）晶界、空隙和裂纹（$10^{-2}\sim1$mm）　它们的破坏是以缺陷面为基础的晶粒间破坏。

5）缺口（1mm 以上）　缺口空间的破坏是由于拉应力集中而引起的破坏。

在微切削去除时，当应力作用的区域在某个缺陷空间范围内，则将以与该区域相应的破坏方式而破坏。各种破坏方式所需的加工能量也是不同的。图 8-5 为材料微观缺陷分布的情况。表 8-2 列出了典型微细去除加工时材料各种微观缺陷空

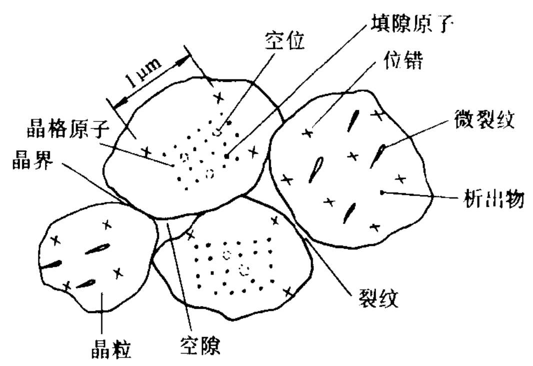


图 8-5　材料微观缺陷分布

间破坏的加工能量。加工能量可用临界加工能量密度δ (J/cm^3) 表示，它是当应力超过材料弹性极限时，在去除相应的空间内，由于材料微观缺陷而产生破坏的加工能量密度。加工能量还可用单位体积切削能量ω (J/cm^3) 表示，它是指在产生该加工单位切屑时，消耗在单位体积上的加工能量。在以原子、分子为加工单位的情况下，通常可把两者看成大致相等。以原子、分子为加工单位时的微细加工就是把原子、分子一个一个地去除，这时不管用什么加工方法，其所需临界加工能量密度相当于材料的结合能量与活化能量的总和，大致相等。但对于蒸发和溅射去除，尚需加上一定的动能，故其加工能量要多一个数量级。

表 8-2 临界加工能量密度 (J/cm^3)

<table>
<tr><td>加工单位/mm</td><td colspan="4">10^{-7} 10^{-6} 10^{-4} 10^{-2} 1</td></tr>
<tr><td>材料微观缺陷 / 加工机理</td><td>晶格原子</td><td>点缺陷</td><td>位错缺陷微裂纹</td><td>晶界、空隙裂纹</td></tr>
<tr><td>化学分解、电解</td><td colspan="2">10^4～10^3</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>脆性破坏</td><td></td><td colspan="3">10^4～10^2</td></tr>
<tr><td>塑性变形（微量切削、抛光）</td><td></td><td></td><td colspan="2">10^3～1</td></tr>
<tr><td>熔化去除</td><td colspan="2">10^4～10^3</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>蒸发去除</td><td>10^5～10^4</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>离子溅射去除、电子刻蚀去除</td><td>10^5～10^4</td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

二、原子、分子加工单位时的加工机理

微细加工的方法很多，方法不同，加工机理各异。当前，可以认为微细加工主要指 1mm 以下的微细尺寸零件，加工精度为 0.01～0.001mm 的加工，即微细度为 0.1mm 级的亚毫米级的微细零件加工；而超微细加工主要指 1μm 以下的超微细尺寸零件，加工精度为 0.1～0.01μm 的加工，即微细度为 0.1μm 级的亚微米级的超微细零件加工。今后的发展是要进行微细度为 1nm 以下的毫微米（纳米）级的超微细加工。要进行微细度为纳米级的超微细加工，就需要用比它小一个数量级的尺寸作加工单位，即要用加工单位为 0.1nm 的微细加工方法来进行加工。显然，这就是原子、分子加工单位的微细加工方法。表 8-3 列出了多种加工的机理，有分解、蒸发、扩散、溅射、沉积、注入等。从加工机理来看，微细加工可分为分离、结合、变形三大类。分离加工又称去除加工，其机理是从工件上去除一块材料，可以用分解、蒸发、扩散、切削等手段去分离。结合加工又可称之为附着加工，其机理是在工件表面上附加一层别的材料。如果这层材料与工件基体材料不发生物理化学作用，只是覆盖在上面，就称之为附着，也可称之为弱结合，典型的加工方法是电镀、蒸镀等。如果这层材料与工件基体材料发生化学作用，生成新的物质层，则称之为结合，也可称之为强结合，典型的加工方法有氧化、渗碳等。变形加工又可称之为流动加工，其机理是通过材料流动使工件产生变形，其特点是不产生切屑，典型的加工方法是压延、拉拔、挤压等。长期以来，对变形加工的概念停留在大型、低精度的认识上，实际上微细变形加工可以加工极薄（板厚为几微米）或极细（丝径为几微米）的成品材料。

表 8-3 原子、分子加工单位的微细加工方法机理

加工机理		加工方法
分离加工（去除加工）	化学分解（气体、液体、固体）	刻蚀（曝光）、化学抛光、软质粒子机械化学抛光
	电解（液体）	电解加工、电解抛光
	蒸发（真空、气体）	电子束加工、激光加工、热射线加工
	扩散（固体）	扩散去除加工
	熔化（液体）	熔化去除加工
	溅射（真空）	离子束溅射去除加工、等离子体加工
结合加工（附着加工）	化学附着	化学镀、气相镀
	化学结合	氧化、氮化
	电化学附着	电镀、电铸
	电化学结合	阳极氧化
	热附着	蒸镀（真空蒸镀）、晶体生长，分子束外延
	扩散结合	烧结、掺杂、渗碳
	熔化结合	浸镀、熔化镀
	物理附着	溅射沉积、离子沉积（离子镀）
	注入	离子溅射注入加工
变形加工（流动加工）	热表面流动	热流动加工（气体火焰、高频电流、热射线、电子束、激光）
	粘滞性流动	液体、气体流动加工（压铸、挤压、喷射、浇注）
	磨擦流动	微粒子流动加工

第四节 微细加工方法

一、微细加工方法分类

微细加工方法和精密加工方法一样，可以分为切削加工、磨料加工、特种加工和复合加工四类，而且从方法上来说，微细加工方法和精密加工方法有许多方法是共同的，没有什么分界，例如金刚石刀具切削，在精密加工中为金刚石刀具精密切削或超精密切削，在微细加工中则为金则石刀具微细切削或超微细切削。同一加工方法，既是精密加工方法，也是微细加工方法，即既可以用于精密加工中，也可以用于微细加工中。当然，有一些加工方法主要用于微细加工中，如光刻、镀膜、注入等。表 8-4 列出了一些常用的微细加工方法。对于微细加工，由于加工对象与集成电路关系密切，故采用分离加工、结合加工、变形加工这样从机理来分类较好。

对于分离加工，与精密加工相同，又分为切削加工、磨料加工（分固结磨料和游离磨料）、特种加工和复合加工。

对于结合加工，又可分为附着、注入、接合三类，附着指附加一层材料；注入指表层经处理后产生物理、化学、力学性质变化，可统称为表面改性，或材料化学成分改变，或金相组织变化；接合指焊接、粘接等。

对于变形加工，主要指利用气体火焰、高频电流、热射线、电子束、激光、液流、气流和微粒子流等的力、热作用使材料产生变形而成形，是一种很有前途的微细加工方法。

表 8-4　常用微细加工方法

分类		加工方法	精度/μm	表面粗糙度 R_a/μm	可加工材料	应用范围
分离加工	切削加工	等离子体切割			各种材料	熔断钼、钨等高熔点材料，合金钢，硬质合金
		微细切削	1～0.1	0.05～0.008	有色金属及其合金	球、磁盘、反射镜，多面棱体
		微细钻削	20～10	0.2	低碳钢，铜、铝	钟表底板，油泵喷嘴，化纤喷丝头，印刷线路板
	磨料加工	微细磨削	5～0.5	0.05～0.008	黑色金属、硬脆材料	集成电路基片的切割，外圆、平面磨削
		研磨	1～0.1	0.025～0.008	金属、半导体、玻璃	平面、孔、外圆加工，硅片基片
		抛光	1～0.1	0.025～0.008	金属、半导体、玻璃	平面、孔、外圆加工，硅片基片
		砂带研抛	1～0.1	0.01～0.008	金属、非金属	平面、外圆
		弹性发射加工	0.1～0.001	0.025～0.008	金属、非金属	硅片基片
		喷射加工	5	0.01～0.02	金属、玻璃、石英、橡胶	刻槽、切断、图案成形，破碎
	特种加工	电火花成形加工	50～1	2.5～0.02	导电金属、非金属	孔、沟槽、狭缝、方孔、型腔
		电火花线切割加工	20～3	2.5～0.16	导电金属	切断、切槽
		电解加工	100～3	1.25～0.06	金属、非金属	模具型腔、打孔、套孔、切槽、成形、去毛刺
		超声波加工	30～5	2.5～0.04	硬脆金属、非金属	刻模、落料、切片、打孔、刻槽
		微波加工	10	6.3～0.12	绝缘材料、半导体	在玻璃、石英、红宝石、陶瓷、金刚石等上打孔
		电子束加工	10～1	6.3～0.12	各种材料	打孔、切割、光刻
		离子束去除加工	0.01～0.001	0.02～0.01	各种材料	成形表面、刃磨、割蚀
		激光去除加工	10～1	6.3～0.12	各种材料	打孔、切断、划线
		光刻加工	0.1	2.5～0.2	金属、非金属、半导体	刻线、图案成形
	复合加工	电解磨削	20～1	0.08～0.01	各种材料	刃磨、成形、平面、内圆
		电解抛光	10～1	0.05～0.008	金属、半导体	平面、外圆孔、型面、细金属丝、槽
		化学抛光	0.01	0.01	金属、半导体	平面
结合加工	附着加工	蒸镀			金属	镀膜、半导体器件
		分子束镀膜			金属	镀膜、半导体器件
		分子束外延生长			金属	半导体器件
		离子束镀膜			金属、非金属	干式镀膜、半导体器件、刀具、工具、表壳
		电镀(电化学镀)			金属	电铸型、图案成形、印刷线路板
		电铸			金属	喷丝板、栅网、网刃、钟表零件
		喷镀			金属、非金属	图案成形、表面改性
	注入加工	离子束注入			金属、非金属	半导体掺杂
		氧化、阳极氧化			金属	绝缘层
		扩散			金属、半导体	掺杂、渗碳、表面改性
		激光表面处理			金属	表面改性、表面热处理
	接合加工	电子束焊接			金属	难熔金属、化学性能活泼金属
		超声波焊接			金属	集成电路引线
		激光焊接			金属、非金属	钟表零件、电子零件
变形加工		压力加工			金属	板、丝的压延、精冲、拉拔、挤压，波导管，衍射光栅
		铸造(精铸、压铸)			金属、非金属	集成电路封装，引线

二、微细加工的基础技术

从上述微细加工的分类中可以看出，许多加工方法都与电子束、离子束、激光束统称之为三束加工有关，它们是微细加工的基础，现分别阐述其原理和方法。

1. 电子束加工

(1) 电子束的热效应及其加工　电子束加工是利用电子束的高能量密度进行钻孔、切槽、光刻等工作。电子是一个非常小的粒子（半径为 2.8×10^{-12}mm），质量很小（9×10^{-28}g），但其能量很高，可达几百万电子伏（eV）。电子束可以聚焦到直径为 1～2μm，因此有很高的能量密度，可达 10^9W/cm²。高速高能量密度的电子束冲击到工件材料上时，在几分之一微秒的瞬时，入射电子与原子相互作用（碰撞），在发生能量变换的同时，有一些向材料内部深入，有些电子发生弹性碰撞被反射出去，成为反射电子。在电子与原子的碰撞中，使原子振动产生发热现象，虽然还产生二次电子、荧光、X 射线等，占用了一部分能量，但可以认为几乎所有的能量都变成了热能。由于电子束的能量密度高、作用时间短，所产生的热量来不及传导扩散就将工件被冲击部分局部熔化、气化、蒸发成为雾状粒子而飞散，这是电子束的热效应。电子束加工就是靠电子束的热效应现象。高能电子束具有很强的穿透能力，穿透深度为几微米甚至几十微米，如工作电压为 50kV 时，加工铝的穿透深度为 10μm，而且以热的形式传输到相当大的区域。电子束的加工过程可用如图 8-6 所示模型来说明。

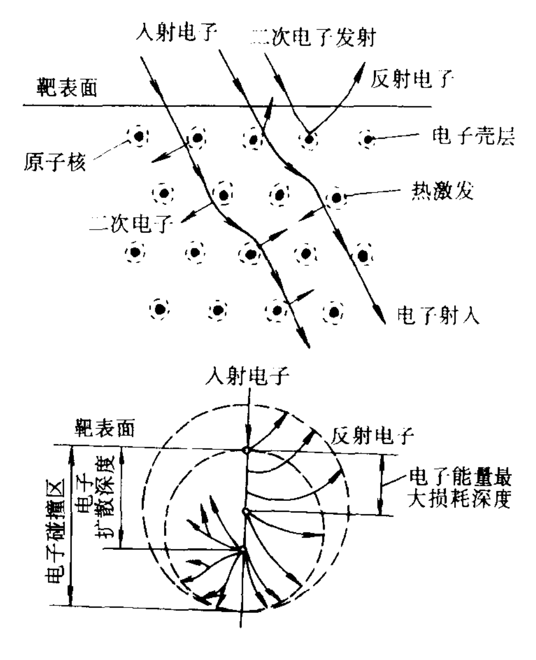


图 8-6　电子束加工过程模型

电子束照射在工件表面上的功率密度 q 有如下关系：

$$q=V\cdot I/\pi r^2 \tag{8-1}$$

式中　q——功率密度，单位为 W/cm²；

V——工作电压，单位为 V；

I——电流，单位为 A；

r——电子束斑半径，单位为 cm。

例如：设 $V=150$kV，$I=10$mA，$r=0.01$cm，则电子束照射在工件表面的功率密度 q 约为 5×10^6W/cm²，足以使任何材料气化和蒸发，如钨的熔化温度高达 3410℃，气化所需功率密度为 0.1×10^6W/cm²，可见电子束的能量是非常高的。

利用电子束的热效应可进行钻孔、切槽、焊接、淬火等工作。要说明电子束的这些加工方法，就必须分析在照射时材料表面的温度分布，如图 8-7b 所示。设工件为半无限大物体，热学常数为定值，在电子束连续照射无限长时，其中心部分达到热平衡温度，称饱和温度 θ_0，其关系式为

$$\theta_0=\phi/\pi\lambda r \tag{8-2}$$

式中　θ_0——饱和温度，单位为℃；

ϕ——电子束输入热流量，单位为 W；

λ——材料热导率，单位为 W/(m·K)；

r——电子束斑半径，单位为 m。

上式中，λ 的温度单位是表示温度差和温度间隔，故 1K=1℃。

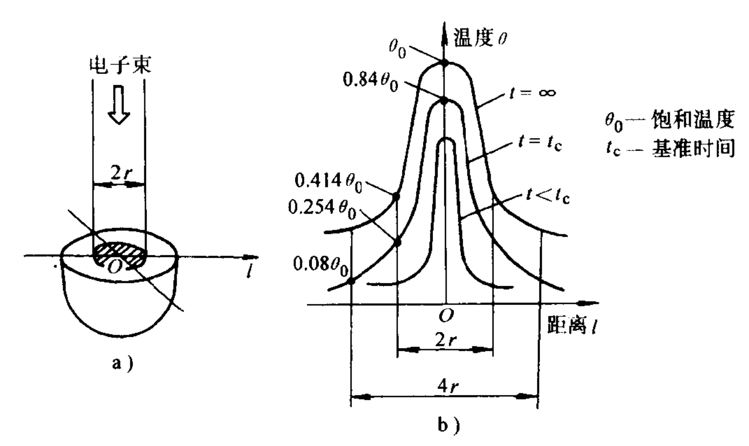


图 8-7 电子束照射下材料表面的温度分布

a）工件模型 b）温度分布

从温度分布图中可以看出，经过 t_c 时间后，工件被照中心部分的温度将上升到饱和温度的 0.84，而在离中心两倍束斑半径的地方，温度上升甚少，只有饱和温度的 0.08，这样就可以做到只使电子束照射区（$2r$）蒸发，而其他地方保持较低的温度。时间 t_c 称之为基准时间，其关系式为

$$t_c=\pi r^2\rho c/\lambda \tag{8-3}$$

式中 t_c——电子束照射基准时间，单位为 s；

ρ——材料密度，单位为 kg/m^3；

c——材料比热容，单位为 J/kg·K，该单位可转换为 W·s/（kg·K）。

电子束加工所需的功率密度和基准时间与工件材料有关，如设电子束斑半径为 0.01cm，则加工铜时要求功率密度为 $1.4\times10^6W/cm^2$，照射基准时间为 0.3ms；加工玻璃时要求功率密度为 $3.6\times10^6W/cm^2$，照射基准时间为 0.55ms。

图 8-8 表示了利用电子束热效应进行的各种加工。图 8-8a 是在低功率密度照射时，电子束中心部分的饱和温度在熔化温度附近，这时蒸发缓慢且熔化坑较大，可作电子束熔凝处理，提高表层的硬度和强度，是一种表面改性技术。图 8-8b 是用中等功率密度照射时，出现熔化、气化和蒸发，如果材料是透明的，可以看到一些气泡状的东西，这些气泡在照射完后会保持原状固化，中等功率密度照射可用于电子束焊接。图 8-8c 是用高功率密度照射时，电子束中心部分的饱和温度远远超过蒸发温度，由于气泡内的压力大于熔化层表面张力，使材料从电子束的入口处排除出去，并有效地向深度方向加工，这就是电子束打孔的情况，对于一般金属材料，功率密度需要 $10^6\sim10^9W/cm^2$。高功率密度电子束除钻孔、切槽外，在集成电路薄膜元件制作中，利用蒸发可获得高纯度的沉积薄膜。

（2）电子束的化学效应及其加工 用功率密度相当低的电子束照射高分子材料时，即使几乎不会引起材料表面温度的上升，也会由于入射电子和高分子相碰使其分子链切断或重新聚合，从而使材料的相对分子质量和化学性质产生变化，这就是电子束的化学效应。利用这一效应可进行电子束光刻。

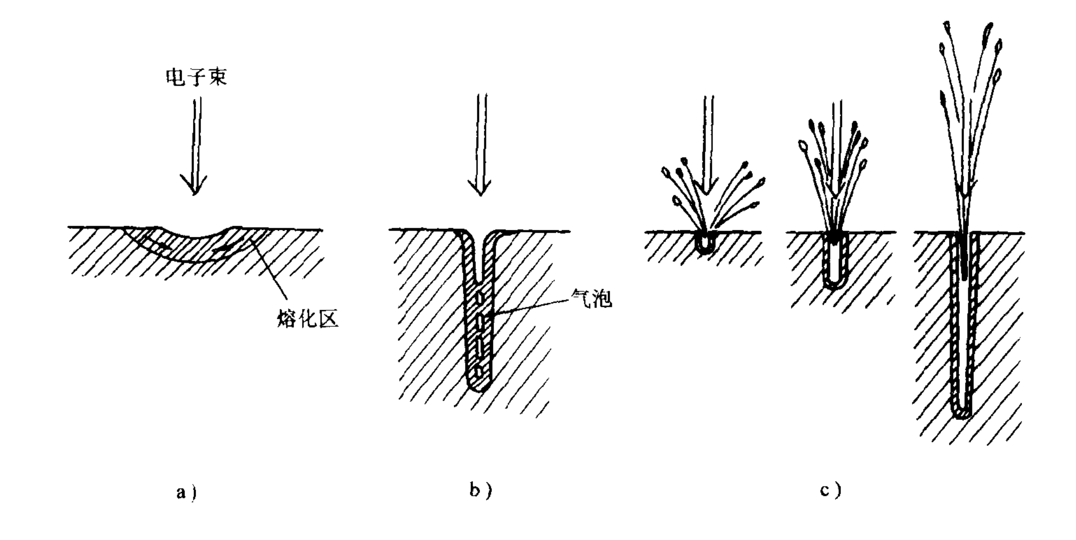


图 8-8 利用电子束热效应的加工

a）低功率密度照射 b）中等功率密度照射 c）高功率密度照射

在电子束光刻中，电子束主要用来曝光。它有两种方式，一种为电子束扫描曝光，另一种是电子束投影曝光。

1）电子束扫描曝光 它是利用图形发生器，将聚焦在 1μm 以内的电子束在大约 0.5～5mm 的范围内自由扫描，在光致抗蚀剂上绘制图形。这种方法称之为写图，它主要用于掩膜或基片的图形制作。常用的光致抗蚀剂有聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA 胶），当加速电压为 20kV 的电子束以电通密度为 $10^{-8}c/cm^2$ 的剂量照射到厚度为 0.3～1μm 的 PMMA 胶上，则相对分子质量为 10 万的 PMMA 胶大分子就会被切割成相对分子质量为原来的 1/20 左右的分子。由于照射处和未照射处的相对分子质量不同，因此按规定图形扫描曝光，就在光致抗蚀剂涂层上产生潜像。选择合适的显影液，由于相对分子质量不同而溶解速度不一样，潜像就会显示出来。由于分子的体积很小，能在上述光致抗蚀剂上制成最小尺寸为 0.1～1μm 的图形，质量、效率均很高。图 8-9 为较常用的电子束扫描曝光系统的框图，除电子束的基本系统外，还有测定工件位置的激光系统、扫描用的数模转换系统和束流位置的对准系统等。

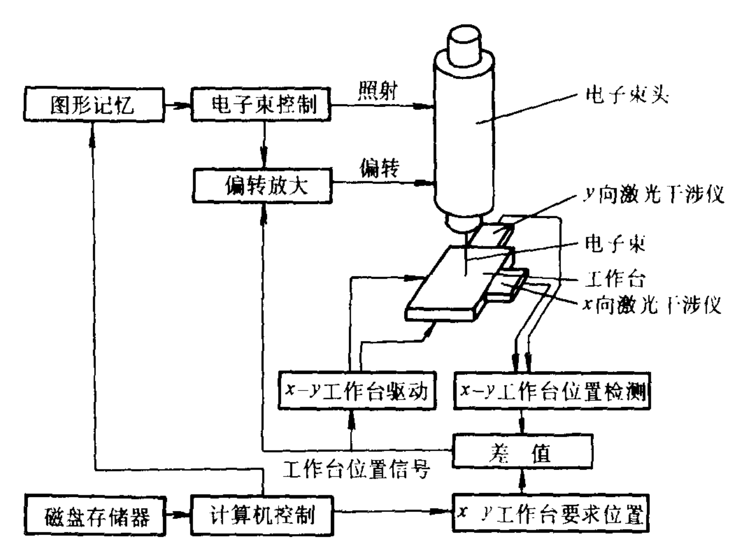


图 8-9 电子束扫描曝光系统框图

2）电子束投影曝光 它是利用电子束作为光源，使它通过原版，再以 1/5～1/10 的比例缩小投影到光致抗蚀剂上进行图形的曝光。这种方法的原理是缩小投影复印，故又称之为电子束复印。其优点是图形精度高（图形分辨力可达 0.5μm），速度快，生产率高，成本低，可在基片或掩膜上复印。图 8-10 表示了一种缩小投影型电子曝光装置。

(3) 电子束加工装置　电子束加工装置主要由电子枪系统、真空系统、控制系统和电源系统等组成，如图 8-11 所示。

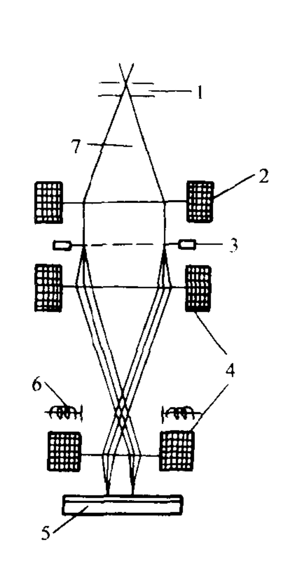


图 8-10　缩小投影型电子曝光装置
1—电子枪　2—照射透镜　3—掩模版
4—缩小投影透镜　5—工件
6—位置对准　7—电子束

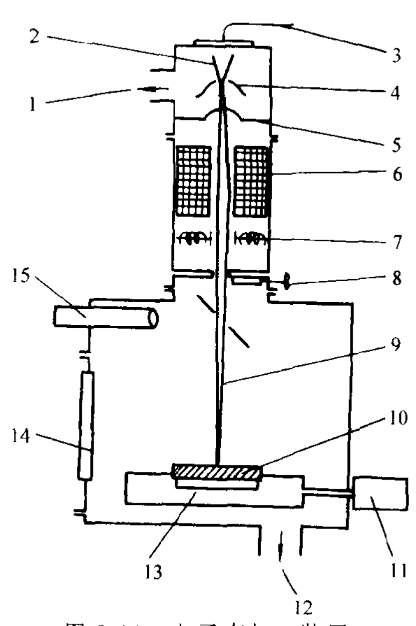


图 8-11　电子束加工装置
1—抽真空　2—阴极　3—加速电压　4—控制栅极　5—加速阳极
6—束流聚焦控制线圈　7—束流位置控制　8—更换工件时用的截止阀　9—电子束　10—工件　11—驱动电机　12—抽真空
13—移动工作台　14—工件更换盖及观察窗　15—观察镜

电子枪用来发射高速电子流，它是在真空条件下，利用电流加热阴极 2 发射电子束，经控制栅极 4 初步聚焦后，由加速阳极 5 加速。阴极可用纯钨、钨钽、硼化镧等材料制成。控制栅极为中间有孔的圆筒，在其上加比阴极较负的偏压，起束流强度控制和初步聚焦作用。在加速阳极上加比阴极为正的高压，起吸引和加速电子流的作用。

真空系统是抽真空，真空度为 $1.33\times(10^{-2}\sim10^{-4})$ Pa，因为在真空中电子才能高速运动，发射阴极不会在高温下被氧化，同时也防止被加工表面和金属蒸气氧化。为了消除加工时金属蒸气对电子发射不稳定的影响，电子束加工多采用开式真空系统，即不断地抽出加工中产生的金属蒸气。

控制系统由聚焦装置、偏转装置和工作台位移装置等组成，控制电子束束斑大小、方向和工件位移。

电源系统提供稳压电源、各种控制电压及加速电压。

(4) 电子束加工的特点及其应用　电子束加工与其它加工方法相比，有许多特点。

1) 束径小、能量密度高　电子束能够极其微细的聚焦，束径可达 100～0.01μm 范围。同时，最小束径的电子束长度可达其束径的几十倍，故能适于深孔加工。

2) 被加工对象范围广　电子束加工是靠热效应和化学效应，热影响范围可以很小，又是在真空中进行，加工处化学纯度高，故适于加工各种硬、脆、韧性金属和非金属材料、热敏材料、易氧化金属及合金、高纯度半导体材料等。由于在加工时工件上很少产生应力和变形，故适于加工易变形零件。

3) 加工速度快、效率高。

4）控制性能好，易于实现自动化　可通过磁场或电场对电子束的强度、束径、位置进行迅速准确地控制，且自动化程度高。易于加工图形、圆孔、异形孔、盲孔、锥孔、弯孔及狭缝等。

电子束加工的应用范围很广，可用打各种孔、切槽、焊接、光刻、表面改性等工件。它既是一种精密加工方法，又是一种重要的微细加工方法。近年来，出现了多脉冲电子束照射等技术，使电子束加工有了更进一步的发展。

2. 离子束加工

（1）离子束的力效应及其溅射现象　离子束加工是在真空条件下，将氩（Ar）、氪（Kr）、氙（Xe）等惰性气体通过离子源产生离子束，经加速、集束、聚焦后，射到被加工表面上以实现各种加工的方法。

原子是由原子核和围绕原子核运动的各层轨道上的电子组成，呈中性。原子电离后成为离子，失去外层电子的原子变成带正电荷的正（阳）离子，获得多余电子的原子变成带负电荷的负（阴）离子。可见离子的质量远远大于电子的质量，如一个氩离子的质量是电子质量的7.2万倍，离子在电场中的加速过程比电子慢，速度也较低，但一旦加速后，具有远远高于电子的动能，高达10keV量级，因此离子束加工是通过弹性碰撞，轰击工件表面，其穿透能力很强，一个具有1keV能量的离子，其穿透深度通过电子衍射条纹估算为5μm。加工时被加工表面层不产生热量，不引起机械应力和损伤。因此离子束加工是通过其力效应来进行的，与电子束加工形成鲜明的对比。

质量大动能高的离子冲击工件表面时，将产生弹性碰撞，将能量传递给工件材料的原子、分子，其中一部分能量使原子、分子产生溅射，被抛出工件表面，这称为离子束溅射现象，其余能量将转变为材料晶格的振动。

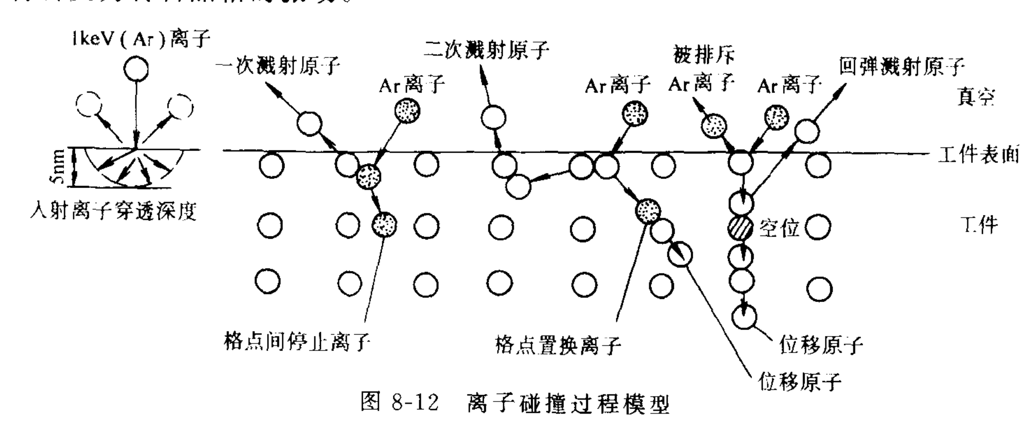


图 8-12　离子碰撞过程模型

离子碰撞过程可用图8-12所示模型来说明，有以下几种情况：

1）一次溅射　由离子直接碰撞工件表面层材料中的原（分）子，使该原（分）子分离出工件表面。

2）二次溅射　由离子碰撞材料中的原（分）子，这个原（分）子又去碰撞别的原（分）子，而使后来被撞的原（分）子分离出工件表面。

3）回弹溅射　有些受到离子碰撞的原（分）子，又去碰撞别的原（分）子，但自己却被反弹出工件表面外。这种情况是反向溅射或背散射。

4）排斥离子　有些离子在碰撞原（分）子时，自己反被弹出工件表面外，成为被排斥的离子。可见这种情况下没有溅射去除作用。

5）置换离子　离子撞击工件表面时被留于表面层材料中，成为置换离子。这种情况也无溅射去除作用。

现以最简单的直线弹性碰撞为例，在一次碰撞中所传递的动能可用下式表示。

$$E=4E_0m_0m/(m_0+m)^2 \tag{8-4}$$

式中　E——传递给原（分）子的能量，单位为eV；

E_0——入射离子能量，单位为eV；

m_0——入射离子质量，单位为u；

m——被撞击的原（分）子质量，单位为u。

由上式可知，当$m_0\approx m$时，$E\approx E_0$，溅射效果最好。现举一例子来具体说明，若用原子量分别为40、89、131的Ar、Kr、Xe作为加工用的离子，对玻璃材料SiO_2进行溅射加工，由于Si的原子量为28，O_2的分子量为16×2=32，那么，如果以Si原子和O_2分子的形式溅射去除，则选用Ar的加工效率将最好，因为Ar的原子量与Si的原子量和O_2的分子量比较接近。

图8-13表示了上述例子中三种离子的能量与溅射率的关系，溅射率是指被一个入射离子所去除的原子或分子数，可以看出，Ar的溅射率最高，Kr次之，Xe最低。同时还可以看出，随着离子能量的增加，溅射率可以达到饱和，甚至还有逐渐下降的趋势，这是由于当离子能量较小时，入射离子与工件表面原子、分子的碰撞，以直接弹性碰撞为主，处于溅射去除为主的状态，随着离子能量的增加，溅射率越高。但当离子能量超过一定值后，入射离子会深入到工件材料内部一定深度，在那里进行能量交换，速度有所降低，碰撞的机率增加，由此而产生的非弹性碰撞增加，所以溅射率达到饱和状态。如果采用高能离子轰击工件表面，则打进材料中的离子，其电荷可能被中和，变成置换原子或成为晶格间的填隙原子，而被残留在工件表层材料中，这就是离子注入的情况。这时溅射率可能会有所下降。

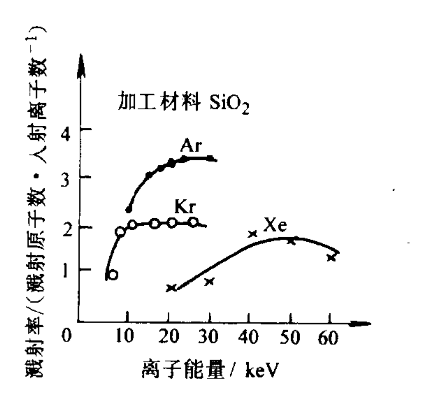


图8-13　离子能量与溅射率

离子束的入射角与溅射率也有关，如图8-14中的实验曲线可知，当入射角为0°（即与表面垂直）时，溅射率最低。随着入射角的增加，溅射率逐渐增加。图中还表示了入射角与相对溅射速度的关系。相对溅射速度是指相对于离子束的单位面积电流（A/cm^2），在加工表面垂直方向上的加工速度（cm/s），加工速度用单位时间内的加工深度或体积来表示。图中，离子束的单位面积电流，即电流密度，其单位用A/cm^2表示，加工速度用单位时间内的深度表示，单位为cm/s。可见在入射角近60°时，相对溅射速度最大。在实际加工时，选择入射角是十分重要的，

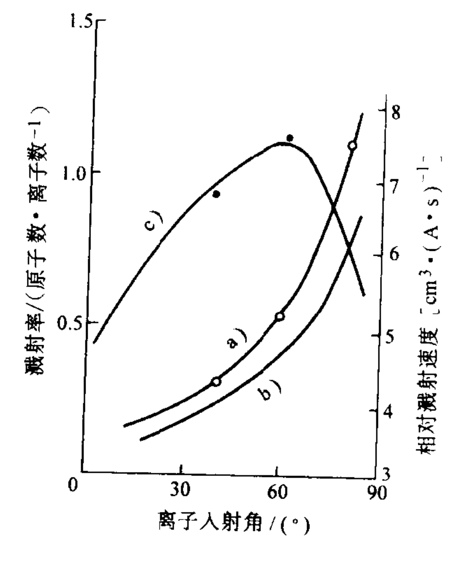


图8-14　离子入射角和溅射率

a)、c）10KeVAr离子加工BK-7玻璃

b）50KeVAr离子加工SiO2玻璃

不仅要考虑溅射率、相对溅射速度，而且要考虑表面粗糙度等问题。

(2)离子束加工方法　离子束加工方法有离子束溅射去除加工、离子束溅射镀膜加工、离子束注入加工和离子束曝光等。

1)离子束溅射去除加工　离子束溅射去除加工可简称为离子束去除加工，其加工原理是利用离子溅射，主要是一次溅射和二次溅射，它是一种最典型的原子、分子加工单位的微细加工方法和超精密加工方法。图 8-15a 是离子束去除加工装置的结构原理图，它由双等离子体离子源、双真空室、聚焦装置、工作台、电源等组成。首先把 Ar、Kr、Xe 等惰性气体充入低真空（1.3Pa）的离子室中，通过阴极 2 与阳极 5 之间的低气压直流电弧放电，使之在阳极以上的空间被电离，成为等离子体。中间电极 3 的电位比阳极 5 低，两者都由软铁制成，和电磁线圈 4 形成很强的轴向磁场，所以以中间电极为界，在阴极和中间电极、中间电极和阳极之间形成两个等离子体区。前者的等离子体密度较低，后者在非均匀强磁场的压缩下，在阳极孔处形成了高密度的等离子体。经过控制电极 7 和引出电极 8，只将正离子拉出呈束状并加速，从阳极小孔进入高真空区（1.3×10^{-6}Pa），再通过静电透镜所构成的聚焦装置 10 聚成高密度细束的离子束，轰击工件表面。工件装于工作台上的摆动装置或回转装置上，可进行双坐标直线位移、绕垂直轴的转动和绕水平轴的摆动。离子束溅射去除加工可用于非球面透镜的成形、金刚石刀具和压头的刃磨、大规模集成电路芯片图形的刻蚀等，可加工金属和非金属材料。所谓离子铣、离子磨（离子减薄）、离子研磨抛光等都是离子束溅射去除的具体形象加工方法。

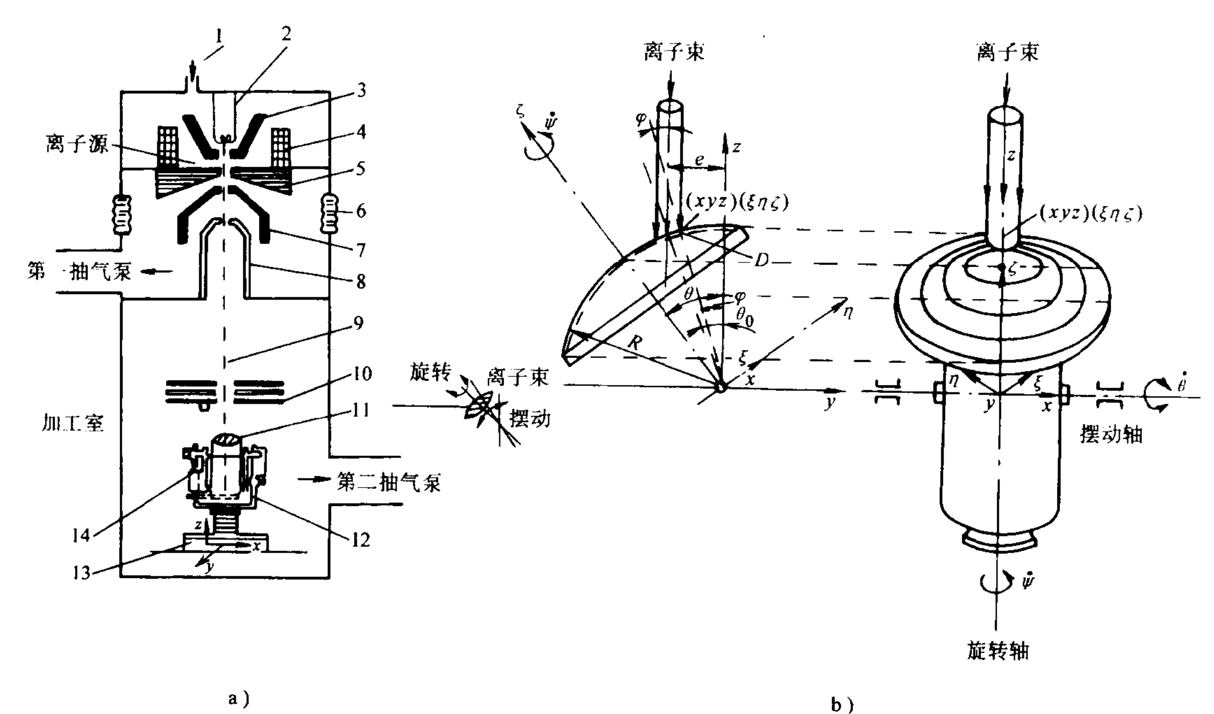


图 8-15　离子束去除加工装置及加工非球面的原理

a) 离子束去除加工装置　b) 离子束加工非球面原理

1—惰性气体入口　2—阴极　3—中间电极　4—电磁线圈　5—阳极　6—绝缘子　7—控制电极　8—引出电极　9—离子束　10—聚焦装置　11—工件　12—摆动装置　13—工作台　14—回转装置

图 8-15b 是离子束溅射去除加工非球面透镜的原理图，该装置装在图 8-15a 中的工作台上，因此具有 x、y、z 三坐标移动的运动系；该装置本身又有绕 x 轴的摆动和绕 z 轴的旋转两个运动系，摆动速度为 θ，旋转速度 ψ。将所要加工的轴对称非球面透镜选出毛坯，毛坯为凸面半径为 R 的近似球面透镜，毛坯安装时，应使其球面中心与摆动轴重合，其光轴与旋转轴重合，图中所示这时旋转轴已不在 z 轴上。

设（ξ、η、ζ）为在透镜毛坯上固定坐标系中表示加工点的坐标，其中 ζ 为光轴（旋转轴），ξ、η 为与之垂直的坐标轴；（x、y、z）为空间固定坐标系中加工点的坐标；D 为加工深度，为所要求的非球面透镜和透镜毛坯各加工点在 ζ 轴上的差。可以看出，每个加工点的位置可同时用（x、y、z）和（ξ、η、ζ）两种坐标表示。

从图中可知，加工点处的离子束入射中心角为 θ_0，此时离子束的轴线偏移摆动轴的距离为 e，$e=R\sin\theta_0$，而每个加工点的入射角为 φ，$\varphi=\tan^{-1}\left(\sqrt{x^2+y^2}/z\right)$。如果在摆动面上使离子束的轴线偏移摆动轴适当距离，则无论怎样摆动或旋转透镜都可使离子束对所加工透镜中心的入射角不变化。

2）离子束溅射镀膜加工　离子束溅射镀膜加工是一种原子、分子级的附着加工，所以有时又称之为离子束溅射附着加工。用被加速了的离子从靶材上打出原子和分子，并将它们附着到工件表面上形成镀膜。镀膜材料置于靶位上，靶面与离子束的方向成一定角度，工件被镀表面与溅射原子、分子方向垂直，如图 8-16 所示。由于离子溅射出来的中性原子、分子有相当大的动能，所以这种镀膜比蒸镀、电镀有较高的附着力，效率也比较高。它又是一种干式镀，因此应用广泛，如在表壳上离子镀氮化钛，呈金黄色，又美观又耐磨；在刀具、工具上离子镀氮化钛，可提高寿命 1～2 倍。溅射镀膜可在金属、非金属（如纸、聚四氟乙烯等塑料等）上制作金属化合物薄膜、合金薄膜和氧化薄膜等。

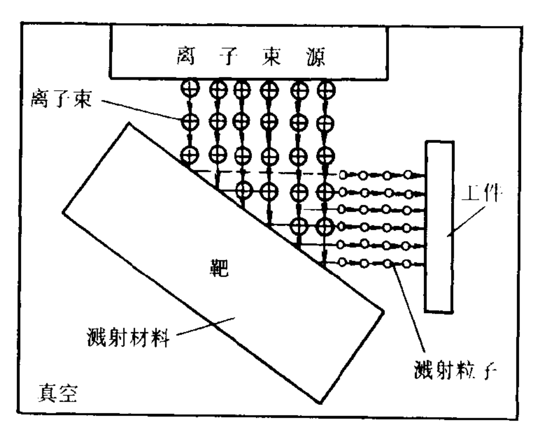


图 8-16　离子束溅射镀膜加工原理图

3）离子束注入加工　离子束注入加工就是将所要注入的元素进行电离，并将正离子分离和加速，形成具有数十万电子伏特的高能离子流，轰击工件表面，离子因动能很大，被打入表层内，其电荷被中和，成为置换原子或晶格间的填隙原子，被留于表层中，使材料的化学成分、结构、性能产生变化。离子注入可用于半导体材料掺杂，金属材料改性等方面。如在单晶硅中注入磷或硼等杂质，已用于晶体管、集成电路、太阳能电池等制作中。金属材料改性是一种表面处理，如将氧离子注入铁中，形成 Fe_3O_4，可增加耐酸性；将氮离子注入高速钢刀具切削刃处，可提高刀具寿命；将铌离子注入锡中，形成 Nb_3O_4，可得超导表面等。

4）离子束曝光　离子束曝光的优点是有高灵敏度和分辨率。由于离子质量远大于电子，在基片上产生背散作用小，引起的邻近效应也小，因此能够对线宽小于 0.1μm 的精密微细图形曝光。同时，由于离子直径、质量比电子大，射入抗蚀剂后受到的阻力也大，离子在抗蚀剂层内的射程也短，离子能量能被抗蚀剂充分吸收，这就提高了抗蚀剂的灵敏度。实验证明，在相同抗蚀剂时，离子束曝光的灵敏度比电子束曝光的灵敏度要高一个数量级以上，由此曝光时间可大为缩短。可以认为，离子束写图和复印是很有前途的。

（3）离子束加工装置　离子束加工装置与电子束装置基本类似，是由离子源、真空系统、控制系统、电源等部分组成。

离子源又称离子枪，其作用是产生离子束。其原理是将惰性气体充入真空室中，利用高频放电、高速电子撞击、电弧放电等方法，使惰性气体被电离为等离子体，并在强电场作用下将正离子从离子源出口孔引出成束。所谓等离子体是由数量相等的正离子与负电子所组成的混合体，呈中性，在物理学上称之为除固、液、气三态外的物质第四态。

离子源有多种类型以适应不同的用途，离子产生的方式也各有不同，有通过放电、高速电子撞击、高温、强光、放射线照射等方法将中性原子电离。常用的离子源主要有双等离子体型、离子簇射（流）型和高频等离子体型等。

1）双等离子体离子源　它是利用阴极和阳极间的直流电弧放电，使氩、氪、氙等惰性气体在阳极小孔以上的低真空中离子化。其结构原理图如图 8-17 所示，双等离子体的形成和受非均匀磁场的压缩过程如图 8-18 所示。双等离子体的意思是指以中间电极为界，形成两个等离子体区。这种离子源可获得高密度的等离子体，电离效率可达 50%～90%，使用非常广泛。图 8-15 所述就是这种离子源的离子束去除加工装置。

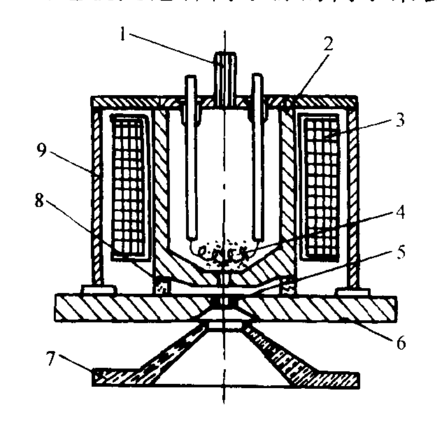


图 8-17　双等离子体离子源结构原理图
1—气体入口　2—中间电极　3—电磁线圈　4—阴极　5—阳极（钼）　6—阳极板（软铁）　7—引出电极（不锈钢）　8—绝缘环　9—导磁环（铁）

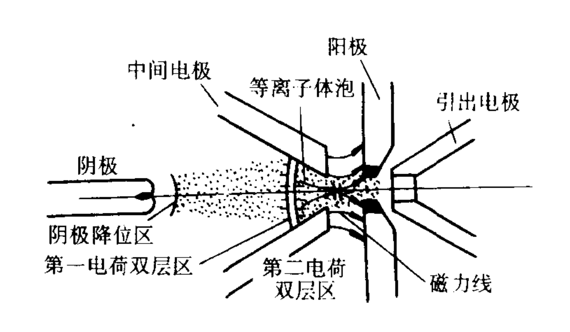


图 8-18　双等离子体的形成过程

2）离子簇射（流）型离子源　又称之为考夫曼型离子源，其原理图示于图 8-19，由热阴极灯丝 2 发射电子，在阳极 9 的吸引下，电子向下方的阴极 7 移动，同时受电磁线圈 4 的磁场偏转作用作螺旋运动前进。惰性气体 Ar 由入口 3 进入电离室 10，受高速电子的撞击而被电离成离子。由阴极 7、阳极 9 和电子抑制栅 8 三个电极片组成静电透镜，三个极片上有几百个相互对准的小孔，离子便由孔中通过，而电子却被挡回去，从而形成平行束流而引出，所以也称之为离子流装置，它是一种大口径、大容量的离子源，离子流直径可达 50～300mm，密度比离子束低些，但均匀稳定，广泛用于集成电路的刻蚀。

3）高频等离子体离子源　简称高频离子源，它是利用高频振荡器在放电室中产生高频电磁场，以加速自由电子与惰性气体原子进行碰撞，使之电离而产生等离子体。其特点是可以获得金属离子、化学性质活泼的气体离子，与其它离子源相比，其束流强度较低。

（4）离子束加工的特点及其应用　离子束加工在微细加工和精密加工中是一种最有前途的原子、分子加工单位的加工方法。其特点可归纳如下。

1）加工精度和表面质量高　离了束加工是靠微观力效应，被加工表面层不产生热量，不

引起机械应力和损伤。离子束斑直径可达 1μm 以内，加工精度可达 nm 级。

2）加工材料广泛　可对各种材料进行加工。由于加工原理是力效应，故对脆性、半导体、高分子等材料都可加工。由于加工是在真空下进行，故适于加工易氧化的金属、合金和半导体材料等。

3）加工方法丰富　离子束加工可进行去除、镀膜、注入等加工，利用这些加工原理出现了多种多样的具体方法，如成形、刻蚀、减薄、曝光等，在集成电路制作中占有极其重要的地位。

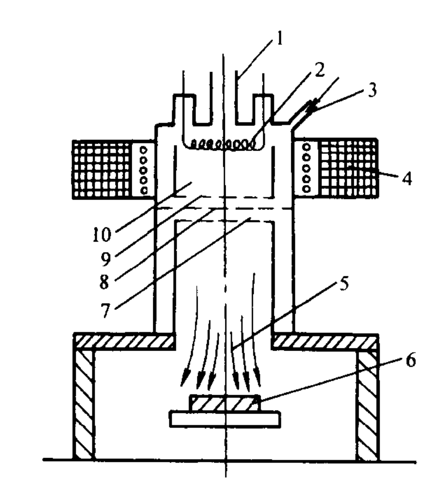


图 8-19　离子簇射（流）型离子源

1—真空抽气口　2—热阴极灯丝　3—惰性气体入口　4—电磁线圈　5—离子束流　6—工件　7—阴极　8—电子抑制栅　9—阳极　10—电离室

4）控制性能好，易于实现自动化

5）应用范围广泛　可根据加工要求选择离子束的束斑直径和能量密度，直径小、能量密度大的离子束用于去除加工；直径大、能量密度较低时适于镀膜、刻蚀；而直径大、能量强的离子束适于注入加工。其应用范围可用图 8-20表示。

3. 激光束加工

（1）激光的产生过程及其特性　激光是一种光，它是通过原子受激辐射发光和共振放大而形成的。

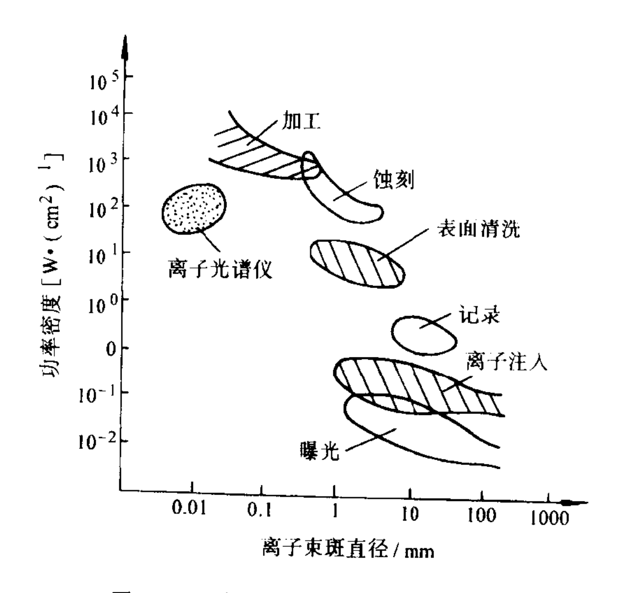


图 8-20　离子束加工的应用范围

原子由原子核和电子组成。电子绕原子核转动而具有动能；电子被原子核吸引而具有势能。两种能量的总和为原子的内能。如果由于外界的作用，使电子与原子核的距离增大或缩小，则原子的内能也随之增大或减小。因此原子具有一些不连续分布的能级，电子在最靠近原子核的轨道上转动时是稳定的，这时原子所处的能级为基态。当有外界能量传入，如光照射，则电子运行轨道半径扩大，原子内能增加，被激发到能量更高能级，这时称之为激发态或高能态。每种原子都有自身的基态和不连续分布的多级高能态。被激发到高能级的原子是不稳定的，总是力图回到低能级去。原子从高能级到低能级的过程称为跃迁。当原子跃迁时，其能量差则以光的形式辐射出来，这就是原子发光，是自发辐射的光，又称荧光。如果在原子跃迁时是受到外来光子（具有一定能量以光速运动的粒子）的诱发，原子就会发射一个与入射光子的频率、相位、传播方向、偏振方向完全相同的光子，这就是受激辐射的光。

原子被激发到高能级后，会很快跃迁回低能级，它停在高能级的时间称为原子在该能级的平均寿命。氦、氖、氪原子，钕离子和二氧化碳分子等在外来能量的激发下，使处于高能

级的原子数大于低能级的原子数，这种状态称为粒子数反转。这时，在外来光子的刺激下，产生受激辐射发光，这些光子通过谐振腔的作用产生放大，受激辐射越来越强，光速密度不断增大，形成了激光。图 8-21 表示了粒子数反转的建立和激光形成，是以红宝石（含 0.05%的 Cr^{3+} 离子的 Al_2O_3 人工晶体）为例，当红宝石受脉冲氙灯照射时，处于基态 E_1 的铬离子大量被激发到 E_3 状态，由于 E_3 状态寿命极短，很快地跃迁到寿命较长的亚稳态 E_2，产生自发辐射，但实现了 E_2 对 E_1 能级的粒子数反转，这时若有能量为 E_2-E_1 大小的光子诱发，就会产生 E_2 对基态 E_1 的受激辐射跃迁而形成激光。

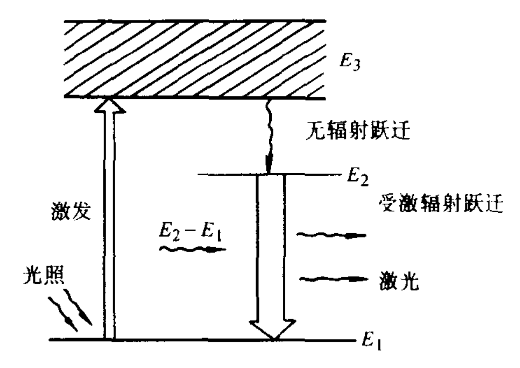


图 8-21　粒子数反转的建立和激光形成

激光除具有普通光的反射、折射、绕射和干涉等共性外，尚有一些特有的特性：

1）强度高、亮度大；

2）单色性好，波长谱线宽度狭窄；

3）相干性好，相干长度长；

4）方向性好，发散角可达 0.1mrad，光束直径可聚到 0.01mm。

激光的上述四个特点是相互联系的。

（2）激光加工的机理　当能量密度极高的激光束照射在加工表面上时，一部分从材料表面反射，一部分透入材料内，其光能被吸收，并转换为热能，使照射区域的温度迅速升高、熔化、气化和熔融溅出而去除材料，如打孔、切割、电阻微调、动平衡等。可以说，激光加工的机理是热效应。

激光加工的加工方法不同，被加工材料不同，其加工机理也不尽相同。如激光焊接时只要求将材料加热到熔化程度而不要求去除；激光热处理只要材料加热到相变温度。一般非金属材料的反射率比金属低得多，故吸收的激光能量也多。有机材料一般具有较低的软化点和熔点，有些有机材料在吸收了激光能量后，内部分子产生激烈振荡，致使靠聚合作用而形成的大分子被解聚，部分材料变成气态，如激光切割有机玻璃时就是这样；在激光加工硬塑料、木材、皮革等有机材料时会产生高分子沉积和加工边缘碳化。陶瓷、玻璃等无机非金属材料，光能吸收率高，但热导性差，激光加工时易产生热应力，裂纹，甚至破碎；但石英材料由于热膨胀系数很小，激光切割和焊接就不成问题。

分析激光加工过程，影响加工的主要因素有激光照射焦面上的能量分布、发射角、焦距、最小束斑直径、被加工材料等。

图 8-22 是激光照射时焦面上能量分布情况，将波长为 λ、束径为 d、输出面上功率为 P 的平行光线，用焦距为 f 的透镜聚焦，则能得到同心圆状的衍射象。由衍射理论可知，在这个焦点平面上，其能量分布是不均匀的，在束径中心，即焦点上的辐照度 E_o 用下式表示：

$$E_o=\frac{\pi}{4}\frac{d^2}{\lambda^2 f^2}P \tag{8-5}$$

而离中心愈远，则辐照度愈弱。

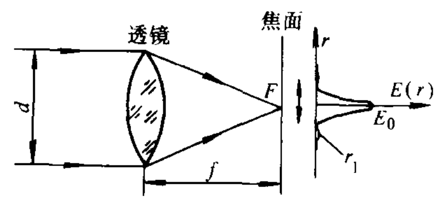


图 8-22　激光照射焦面上的能量分布

从图中所示能量的分布状态可以看出，使得辐照度第一次为零的分布半径为 r_1，它可由下式得到

$$r_1=1.22\frac{\lambda f}{d} \tag{8-6}$$

可见在半径 r_1 的圆面积上集中了全部光通量的84.6%。由式(8-6)可得到激光照射聚焦时在焦面上的束斑直径为：

$$d_1=2.44\frac{\lambda f}{d} \tag{8-7}$$

考虑到发射角 θ 的影响，如图8-23所示，则束斑直径为

$$d_1=f\theta \tag{8-8}$$

$$\theta=2.44\frac{\lambda}{d} \tag{8-9}$$

由于激光有非常好的相干性、单色性、方向性，从激光器发出的全部光通量虽然不大，但进入谐振腔的光都是以固定波长，向固定方向发射，因此聚焦后就能获得非常大的功率密度，如红宝石激光聚焦时，其焦点上的功率密度可达 $10^9W/cm^2$，如果将金属材料放在焦点上，其表面温度将被加热到 10^4 ℃。

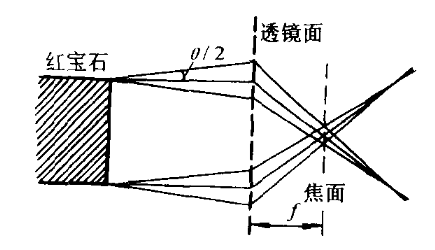


图8-23 发散角与束斑直径

(3) 激光加工方法 激光微细加工方法很多，应用范围广泛，可归纳为激光去除加工、激光表面改性和激光焊接等几类，具体的加工方法有打孔、切割、微调、动平衡、刻蚀、固态相变、合金化、涂敷、熔凝、焊接、激光存储(光盘)等。

1) 激光打孔 利用激光束可对各种材料加工小孔和微孔，最小孔径达几微米，深度可达直径的50倍。激光打孔的过程是热物理现象综合的结果，孔的形成过程如图8-24所示。激光打孔时，用高功率密度脉冲激光源，影响加工质量的因素有激光束的参数（能量、脉宽)、波形、焦距、偏焦量（指工件表面与透镜焦平面的偏离量)、脉冲次数、被加工材料等。典型激光打孔的例子有油泵喷嘴小孔、化纤喷丝板小孔、碳化钨劈刀引线小孔等激光加工。

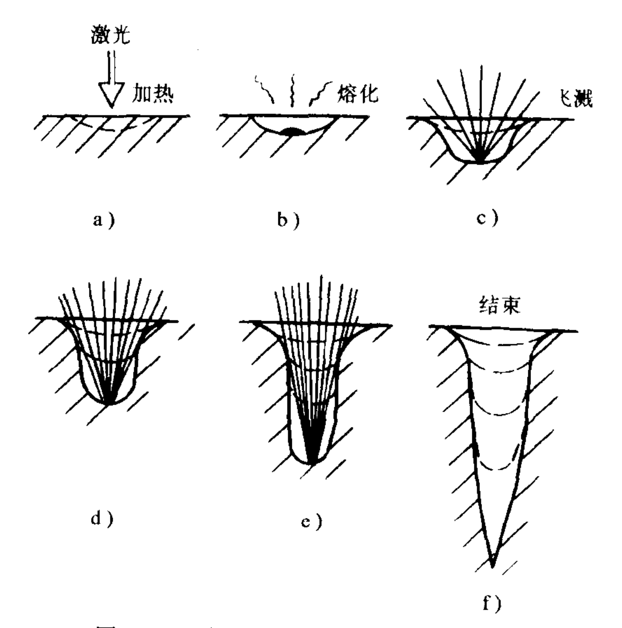


图8-24 激光打孔时孔的形成过程

考虑了激光聚焦因素后，激光打孔时，其孔径 d 与深度 h 可用下式估算：

$$d=2\left[\frac{3E}{\pi(L_B+2L_m)}\right]^{1/3} \tag{8-10}$$

$$h=\left[\frac{3E}{\pi\tan^2\varphi(L_B+2L_m)}\right]^{1/3} \tag{8-11}$$

式中　E——激光脉冲能量，单位为J；

L_B——材料气化热比能，单位为J/cm^3；

L_m——材料熔化热比能，单位为J/cm^3；

φ——光束照射材料表面时的发散半角，当材料处于透镜焦平面时，$\varphi=0$，单位为(°)。

上两式只能作为实际使用时的参考。

2）激光切割　激光切割常用二氧化碳气体激光器，连续或脉冲方式，所切割的切缝窄、边缘质量好，几乎无切割残渣，切割速度高，可切割金属、玻璃、石英、木材、布匹、纸张等各种材料，还可用来半导体材料的划片。

3）激光微调　激光微调主要用于调整电路中某些元件的参数，以保证电路的技术指标。当前是指对电阻的微调。在微电子电路中，一般多采用薄膜电阻和厚膜电阻两种电阻，前者厚度为数百埃至数微米，常用钽或镍铬合金，通过真空蒸镀制作，后者厚度为数微米至数十微米，主要用钯、钌、氧化铊等，由浆料印刷法制作。两种电阻在微调前的阻值偏差可达5%～25%，而很多电路却要求＜1%。传统的微调方法是用机械磨蚀（对厚膜）和电火花蚀除（对薄膜），精度和效率均较低。

激光微调电阻可采用两种方法，一是对电阻进行无损伤照射，使膜的结构变化，从而改变阻值；另一是对电阻进行高能量照射，使部分电阻膜气化去除，从而减小导电膜的截面来增加阻值。目前后一种加工方法用得较多。激光微调精度一般为0.05%，可达0.02%或更小。由于是在非机械接触下工作，适合于加工硬脆材料。激光微调速度快、效率高、无污染，易于动态测量，实现自动化。

4）激光表面改性　利用激光对材料表面进行处理可改变其物理结构、化学成分和金相组织，从而改善材料表面的物理、力学、化学性质，如硬度、耐磨性、耐疲劳性、耐腐蚀性等，称之为激光表面改性技术。现在，激光表面改性方法有激光固态相变硬化（也叫激光淬火）、合金化、涂敷、熔凝等。激光合金化是在廉价材料的表面上添加新的合金元素，用高能激光辐照使基体表层与合金元素融合形成新的合金层，提高表面硬度和耐磨性，增加的合金元素可以有Cr、Ni、W、Ti、Mo等。激光熔凝又称“上光”，它是利用高能量密度的激光束照射金属表面，使表层发生快速熔化，并造成熔化表层和基体之间很大的温度梯度，激光照射离去后，熔化表层快速冷却而凝固，形成极细的晶体结构，可以减少金属表层的化学偏析、熔合其缺陷或裂纹，提

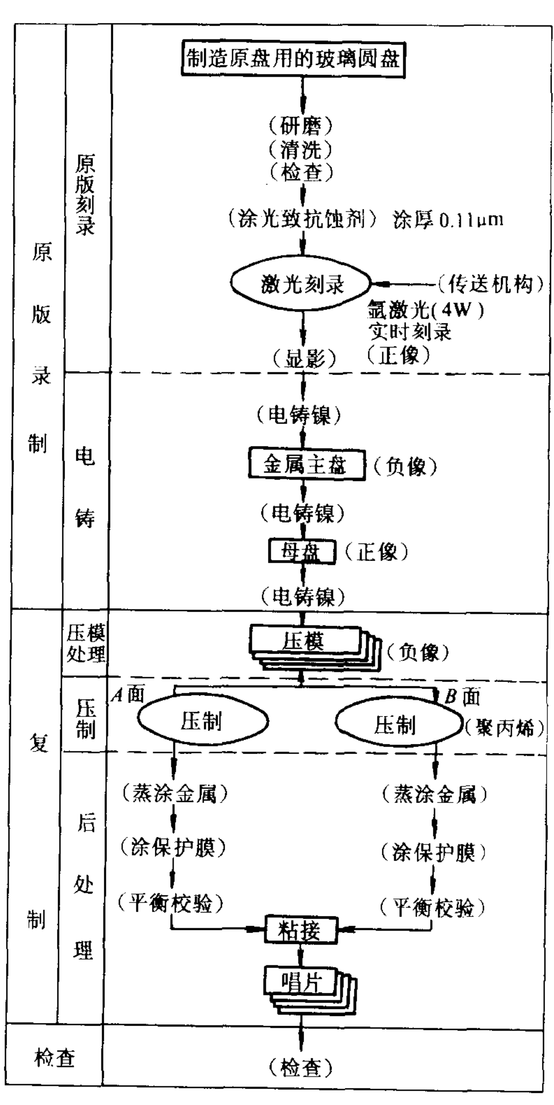


图8-25　激光电视唱片的制造工艺过程

高了硬度、强度和抗腐蚀性，对铸造零件表面改性和焊缝的改性效果十分显著。

5）激光存储　是利用激光进行视频、音频、文字资料、计算机信息等的存取。

激光电视唱片的制作可分为原版录制和复制两个过程，其制造工艺过程如图 8-25 所示。在原版录制时，是将镀有薄金属膜的玻璃圆盘旋转，经调制的激光束相应地沿着玻璃圆盘的半径方向缓慢地由内向外移动，激光束便相应地熔化金属层，使图像与声音记录下来。因此，其加工机理是用激光热效应，是激光去除加工。选用玻璃作基盘是因为玻璃质地均匀，经精密磨削、精密研磨、化学清洗可消除表面缺陷，然后进行真空蒸镀约 0.1μm 厚的金属膜备用。信息是以在金属膜上打出小坑的形式记录下来，坑宽约 0.4μm，坑深约 0.1μm。信息轨迹是一条螺距为 1.6～1.8μm 的螺旋线。

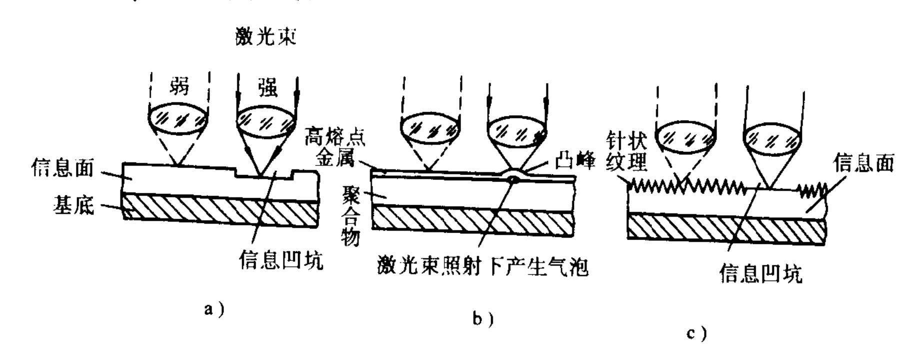


图 8-26　改变信息面几何结构的光盘记录型式

a）凹坑型　b）起泡型　c）纹理型

光盘存储与磁盘存储相比，有存储密度高、数据存取速度快（达 0.1s 左右）、存储寿命长（非接触存取，存储介质表面上有保护层）。其记录方式有回放专用式（相当于只读存储器）、一次写入式（相当于可编程序存储器）、可擦除式（相当于可抹、可编程存储器和随机存储器）。光盘的信息记录通常是采用双态信号的方式来进行，即在光盘上记录一系列“有”与“无”或“高”与“低”等两种互不相同的状态。光盘的记录方式有改变信息面几何结构和改变信息面物理性质两类，每一类光盘又根据双态信号的形式的不同有不同的型式，如图 8-26 所示。

（4）激光加工设备　激光加工设备主要由激光器、电源、光学系统和机械系统等组成，图 8-27 是一台 YAG 激光加工机的结构简图。

1）激光器　又称激光发生器，其种类很多。激光器的作用是把电能转变为光能，产生所需要的激光束。根据产生激光的材料种类不同，激光可分为固体激光、气体激光、液体激光和半导体激光。作为激光加工机，目前主要用固体激光和气体激光，实用的激光器及其性能如表 8-5 所示。

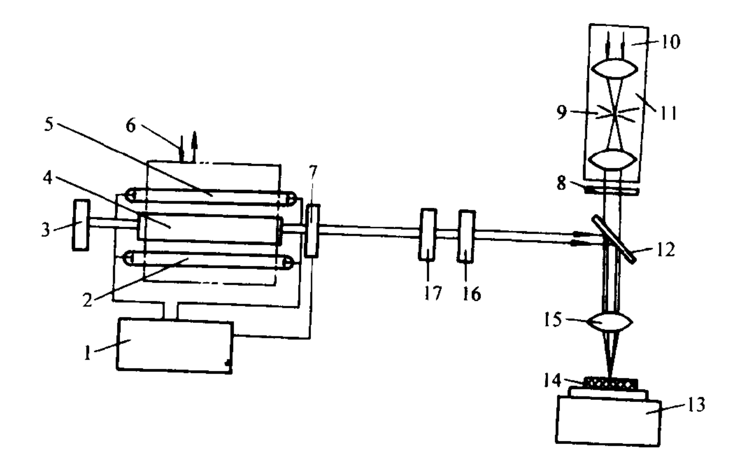


图 8-27　YAG 激光加工机的结构简图

1—电源及控制部分　2—氙灯　3—反射镜　4—YAG 棒　5—氙灯　6—冷却水　7—快门　8—保护滤色镜　9—十字线　10—光源　11—显微镜　12—分光镜　13—工作台　14—工件　15—聚光镜　16—输出镜　17—光阑

表 8-5　激光器及其性能

种类	工作物质	基　体	激活离子	激光波长/μm	发散角/(°)	输出方式	输出能量或功率	主要用途
固体	红宝石	Al_2O_3	Cr^{3+}	0.6943	10^{-2}～10^{-3}	脉冲	几～几十 J	打孔、焊接
	钕玻璃	玻璃	Nd^{3+}	1.065		脉冲		打孔、焊接
	掺钕钇铝石榴石(YAG)	$Y_3Al_5O_{12}$	Nd^{3+}	1.065		脉冲		打孔、切割、微调、刻蚀、焊接
						连续	10^2～10^3W	
气体	二氧化碳	CO_2-He-N_2	CO_2	10.63		脉冲	几 J	切割、微调、焊接、表面改性
						连续	几十～几 kW	

固体激光器由工作物质、光泵、滤光管、滤光液、冷却水、聚光器和谐振腔等组成，如图 8-28a 所示。常用的工作物质有红宝石、钕玻璃、YAG 等。光泵的作用是使工作物质产生粒子数反转，目前对上述工作物质都是用氙灯作光泵，脉冲工作状态的氙灯有脉冲式和重复脉冲式两种，前者只能每隔几十秒工作一次，后者可以每秒工作几次至十几次，但需要水冷却。由于氙灯发出的光波中，有一些紫外线成分，对钕玻璃、YGA 等有害，使激光器的效率下降，故用玻璃套管和重铬酸钾溶液来吸收。聚光器的作用是把氙灯发出的光能聚集在工作物质上，对它的要求是效率高，能把氙灯发出的 80%左右的光能集中在工作物质上，而且聚光均匀，散热好，内壁反射率高，结构紧凑，常用的有球形、圆柱形、椭圆柱形和紧包裹形等(如图 8-28b)，其中圆柱形因制造方便，用得较多。其内壁一般要抛到表面粗糙度 R_a0.025μm，并蒸镀金膜或银膜。谐振腔又称光学共振腔，它使受激辐射光在输出轴方向上多次往复反射，互相激发，链锁反应，起放大和改善激光的作用。谐振控的结构是在工作物质的两端各放一块相互平行的反射镜，其中一块做成全反射，另一块做成部分反射，激光就由此端输出。正确设计反射率和谐振腔长度，就可得到光学谐振，从而得到单色性和方向性很好的激光。

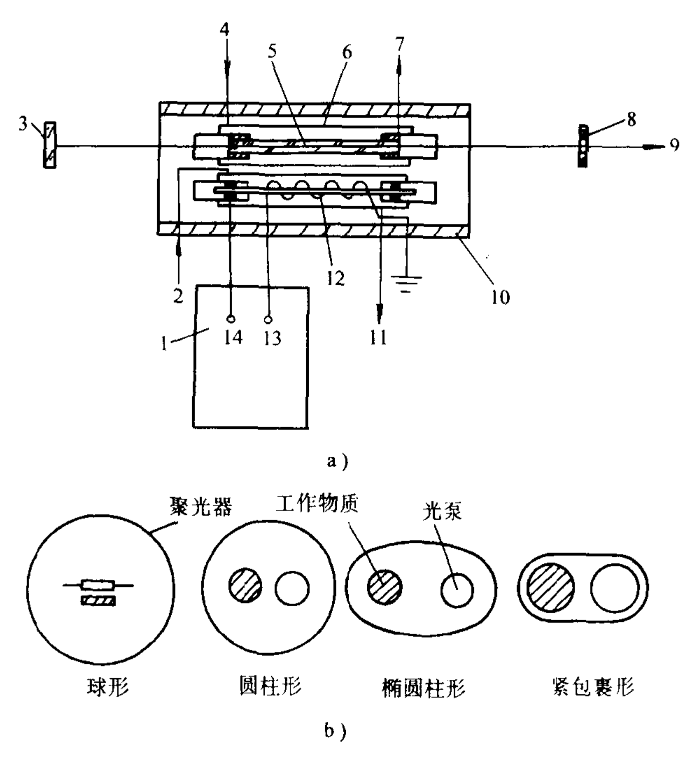


图 8-28　固体激光器结构示意图
a) 固体激光器总体结构　b) 聚光器结构
1—电源　2—冷却水　3—全反射镜　4—冷却水　5—工作物质
6—玻璃套管　7—冷却水　8—部分反射镜　9—激光束
10—聚光器　11—冷却水　12—氙灯
13—触发器　14—电容组

气体激光器的工作物质有氦—氖、二氧化碳等，它是将一定比例的氦—氖混合气体或二氧化碳—氮—氦等气体封入抽真空的玻璃管中，管的两端各装一块反射镜，形成谐振腔，在端部封入电极，通入千伏以上高电压，产生气体放电。大功率激光器可以做成折迭式，图 8-

29 是两种二氧化碳激光器的结构示意图。

2）电源　为各个系统提供能源，其中主要是根据加工工艺要求，为各类激光器提供所需要的能量。由于各类激光器的工作特点不同，电源的种类很多，如固体激光器电源有连续和脉冲两种。常用的固体激光器脉冲电源由调压、升压、整流、充放电、触发器及一些辅助电路所组成。总的说来，激光器电源应包括电压控制、时间控制、触发器、储能电容器等几部分。

3）光学系统　是影响激光加工质量的重要因素之一，其作用是把激光引入聚焦物镜并聚焦在加工工件上，它由激光聚焦系统、观察描准系统和显示系统组成。

4）机械系统　它是整个激光加工设备的总成，要求高精度、高刚度、易调整，其组成包括基座、坐标精密工作台和机电传动控制装置等。先进的激光加工设备已采用数控系统来实现自动化。

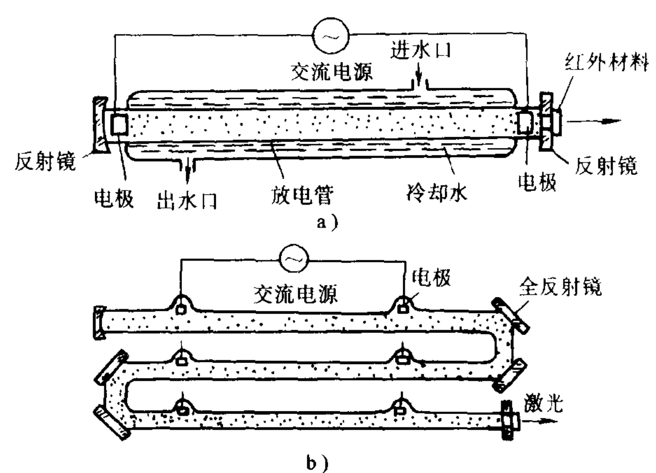


图 8-29　二氧化碳激光器的结构示意图
a）普通式　b）折迭式

(5) 激光加工的特点及其应用　激光加工的特点非常突出，归纳有：

1）加工精度高　激光束斑直径可达 1μm 以下，可进行超微细加工，同时它又是非接触工作方式，力、热变形非常小，易保证高加工精度。

2）加工材料范围广　激光可加工各种金属和非金属材料。对陶瓷、玻璃、宝石、金刚石、硬质合金、石英等难加工材料用激光加工非常有效。对于一些透明材料，也可通过色化或打毛等措施后进行加工。

3）加工性能好　激光加工可以将工件离开加工机进行。不需要真空，也不需要对 X 射线进行防护。可透过玻璃等透明材料进行加工，对某些特殊情况（如真空）下加工比较方便。不需要工具，可通过调整光束大小、能量、脉冲宽度等参数进行打孔、切割、焊接等不同工作。

4）加工速度快、效率高。

5）价格昂贵。

激光加工的应用范围非常广泛，图 8-30 集中表现了其各种加工方法中的所需能量和脉冲宽度，它是一种非常有前途的精密加工和微细加工方法。

图 8-30　激光加工的各种应用

三、光刻加工技术

光刻加工又称光刻蚀加工或刻蚀加工，简称刻蚀，当前，光刻加工技术主要是针对集成电路制作中得到高精度微细线条所构成的高密度微细复杂图形。

光刻加工可分为两个加工阶段，第一阶段为原版制作，生成工作原版或工作掩膜，为光刻加工时用。第二阶段为光刻。

1. 原版制作

原版制作过程如图 8-31 所示，有以下一些主要工序。

(1) 绘制原图　原图一般要比最终要求的图像放大几倍到几百倍，它是根据设计图纸，在绘图机上，用刻图刀在一种叫红膜的材料上刻成。红膜是在透明或半透明的聚脂薄膜表面涂敷一层可剥离的红色醋酸乙烯树脂保护膜而制成，刻图刀将保护膜刻透后，剥去不需要的那一部分保护膜而形成红色图像，即为原图。

(2) 缩版、殖版制作　将原图用缩版机缩成规定的尺寸，即成缩版，视原图放大倍数有时要多次重复缩小才能得到缩版。如果要大量生产同一形状制品，可用缩图在分步重复照相机上作成殖版。

(3) 工作原版或工作掩膜制作　缩版、殖版可直接用于光刻加工，但一般都作为母版保存。从母版复印形成复制版，这就是光刻加工时的原版，称工作原版或工作掩膜（版）。

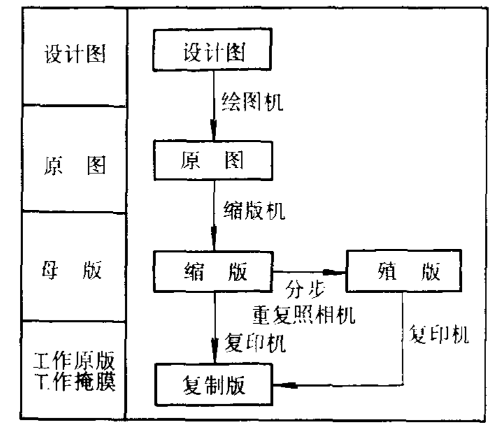


图 8-31　原版制作过程

原版的制作是光刻加工技术的关键，其尺寸精度、图像对比度、照片的浓淡等将直接影响光刻加工的质量。

2. 光刻

光刻加工过程如图 8-32 所示，其主要工序如下：

(1) 涂胶　把光致抗蚀剂（光刻胶）涂敷在氧化膜上的过程称为涂胶。它又可分为正性胶和负性胶（显影图中被光照部分的胶层被去除，形成“窗口”）。常用的涂胶方法有旋转（离心）甩涂、浸渍、喷涂和印刷等。

(2) 曝光　由光源发出的光束，经掩膜在光致抗蚀剂涂层上成像，或将光束聚焦形成细小束斑通过扫描在光致抗蚀剂涂层上的绘制图形，统称之为曝光。前者称之为投影曝光，又称为复印，常用的光源有电子束、X 射线、远紫外线（准分子激光）、离子束等；从投影方式上可分为接触式、接近式、反射式等，前述的原版就是用于投影曝光。后一种曝光称之为扫描曝光，又称为写图，常用的光源有电子束、离子束等。

(3) 显影与烘片　曝光后的光致抗蚀剂，其分子结构产生化学变化，在特定溶剂或水中的溶解度也不同，利用曝光区和非曝光区的这一差异，可在特定溶剂中把曝光图形呈现出来，这就是显影。有的光致抗蚀剂在显影干燥后，要进行 200℃～250℃的高温处理，使它发生热聚合作用，以提高强度，叫做烘片。

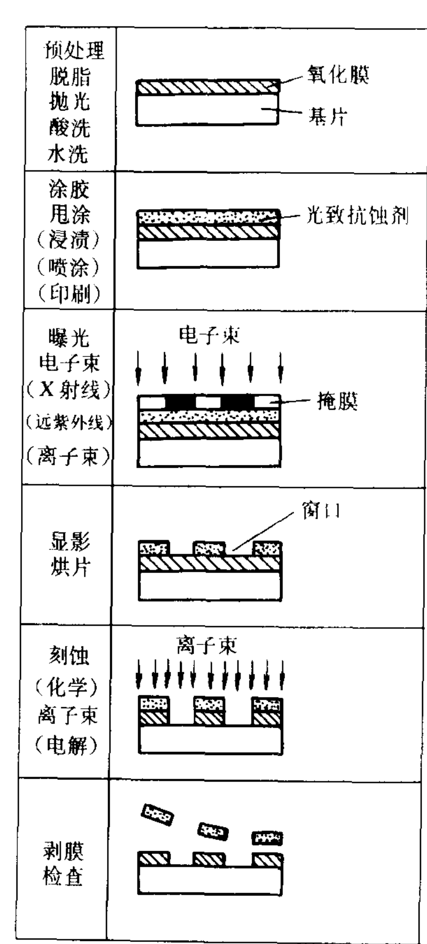


图 8-32　光刻加工过程

(4) 刻蚀　利用化学或物理方法，将没有光致抗蚀剂部分的氧化膜去除，称之为刻蚀。刻蚀的方法很多，有化

学刻蚀、离子刻蚀、电解刻蚀等。刻蚀不仅沿厚度方向，而且也沿横向进行，称之为侧面刻蚀，如图 8-33 所示，若以 ω 表示侧面刻蚀量，以 h 表示刻蚀深度，则刻蚀系数 $C_t=h/\omega$。由于有侧面刻蚀现象，使刻蚀成的窗口比光致抗蚀剂窗口大，因此在设计时要进行修正。侧面刻蚀愈小，刻蚀系数愈大，制品尺寸精度就愈高，精度稳定性也愈好。双面刻蚀比单面刻蚀的侧面刻蚀量明显减小，时间也短，当加工贯通窗口时多采用双面刻蚀。

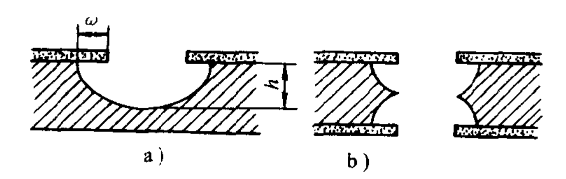


图 8-33　侧面刻蚀现象

a）侧面刻蚀　b）双面刻蚀

（5）剥膜与检查　用剥膜液去除光致抗蚀剂的处理为剥膜。剥膜后洗净修整，进行外观、线条尺寸、间隔尺寸、断面形状、物理性能和电学特性等检查。

复习思考题

8-1　试论述微细加工的含义。

8-2　试述微细加工与精密加工的关系。

8-3　集成电路制作中涉及哪些有关的微细加工技术，这些微细加工方法的作用是什么？与传统的加工概念有何不同？

8-4　了解集成电路制作过程，分析它与精密和超精密加工的关系。

8-5　微小尺寸加工和一般尺寸加工有哪些不同？

8-6　试分析微细加工中的微切削去除机理。

8-7　何谓原子、分子加工单位？

8-8　论述分离、结合、变形三大类微细加工方法的含义及其常用加工方法的特点和应用范围。

8-9　试分析附着加工、注入加工、接合加工 3 种结合加工方法的含义，它们有哪些共同点与不同点？

8-10　试述电子束加工的原理、加工装置、特点及其应用。

8-11　电子束的热效应和化学效应有何不同？利用这两种效应分别有哪些主要加工方法。

8-12　试比较电子束光刻中两种曝光方式（扫描曝光、投影曝光）的特点。

8-13　试述离子束加工的原理、加工装置、特点及其应用。

8-14　试述离子束的溅射过程模型（即离子碰撞过程）。

8-15　试论述离子束的几种溅射加工方法。如何控制离子束去除加工、镀膜加工和注入加工的加工机理转变。

8-16　为什么说离子束加工是最有前途的精密和超精密加工方法？

8-17　试述激光束加工的原理、加工设备、特点及其应用。

8-18　试述影响激光加工的主要因素。

8-19　试述激光加工的各种方法。

8-20　试述光刻加工的过程。

第九章　精密和超精密加工的支撑环境

为了适应精密和超精密加工的需要，达到微米甚至纳米级的加工精度，必须对它的支撑环境加以严格的控制。这里的支撑环境是指精密和超精密加工工艺系统与工人的操作经验及技术水平之外的必须加以控制的各个外部环境。它们主要包括空气环境、热环境、振动环境、声环境、光环境和电场、电磁环境等。各种不同的精密和超精密加工方法，需要对不同的支撑环境方面进行不同程度的控制。对这些支撑环境方面需要控制的品质要求大致如表 9-1 所列。

表 9-1　构成支撑环境的诸方面及控制要求

支撑环境	控制要求	支撑环境	控制要求
空气环境	洁净度、气流速度、压力、有害气体等	声环境	噪声、频率、声压等
热环境	温度、湿度、表面热辐射等	光环境	照度、眩光、色彩等
振动环境	频率、加速度、位移、微振动等	静电环境	静电量、电磁波、放射线等

精密和超精密加工所要求控制的支撑环境都只是在某一范围内的局部环境，如室内的环境或加工区附近的局部环境。随着精密加工和超精密加工所能达到的精度不断的提高，对要求加以控制的支撑环境方面也会越来越多，要求也会越来越高。

第一节　空气环境和热环境

一、空气环境

在我们的日常生活环境与普通车间环境下的空气当中，存有大量尘埃和微粒等物质。对于普通加工方法，这些尘埃和微粒不会有什么不良的影响，但对于精密和超精密加工来说情况就不同了。尘埃和微粒进入加工还常常引起加工精度下降，这是因为空气中尘埃和微粒的尺寸大小与这时的加工精度要求相比，已经成为不可忽视的数值了。例如在计算机硬磁盘表面抛光加工时，如果混入了空气中的坚硬尘埃，就会在加工表面形成划伤而不能正确记录信息，严重时会使磁盘报废。在大规模集成电路元件制造过程中，如果在硅片上混入了空气中的尘埃杂质，它可能会在后续的工序中成为不可控制的扩散源而严重影响产品的合格率。

从表 9-2 可知，大气中含有相当多直径在 0.5μm 以上的尘埃和微粒。虽然在不同的场合，大气中含有尘埃的多少有所不同，但即使是在人们认为比较干净的地方如手术室，每 ft^3 空气中也含有 0.5μm 直径以上的尘埃微粒 50000 个以上。因此为了保证精密和超精密加工产品的质量，必须对周围的空气环境进行净化处理，减少空气中的尘埃含量，即控制空气的洁净度。所谓空气洁净度是指空气中含尘埃量多少的程度。含尘浓度越低则空气洁净度越高，规定以空气洁净度级别来区分之。我国拟定的空气洁净度等级规范见表 9-3。表中给出了各洁净度等级的含尘浓度限定值，它是室内空气含尘浓度的平均值。

表 9-2 日常环境中空气的含尘量

场　所	尘埃粒子数/[个·(ft³)⁻¹]
工厂、车站、学校	2000000
百货店、办公室、药房	1000000
住宅	600000
室外(住宅区)	500000
病房、门诊部	150000
手术室	50000

表 9-3 空气洁净度等级

等　级	每立方米(每升)* 空气中含直径≥0.5μm 尘粒数	每立方米(每升)* 空气中含直径≥5μm 尘粒数
100 级	≤35×100(3.5)*	
1000 级	≤35×1000(35)*	≤250(0.25)*
10000 级	≤35×10000(350)*	≤2500(2.5)*
100000 级	≤35×100000(3500)*	≤25000(25)*

* 弧号中表示每升空气中含直径≥0.5μm 尘粒数

随着半导体工业的快速发展，对空气洁净度的要求提出了更加苛刻的条件，被控制的微粒直径从 0.5μm 减小到 0.3μm，有的甚至减小到 0.1μm 或 0.01μm。因此美国联邦标准 209D 上增加了 1 级和 10 级洁净度级别。表 9-4 中给出了美国联邦标准 209D 各洁净度级别不同直径微粒的浓度限定值。从这个表可以清楚地看出，每 ft^3 空气中所含≥0.5μm 直径尘埃的个数即为所属洁净度级别。如 100 级洁净度即指在 $1ft^3$ 空气中所含≥0.5μm 直径尘埃的个数≤100 个。

表 9-4 各洁净度级别的上限浓度

(个/ft³)

级　别	直径/μm				
	0.1	0.2	0.3	0.5	5
1	35	7.5	3	1	—
10	350	75	30	10	
100	—	750	300	100	
1000	—	—	—	1000	7
10000	—	—	—	10000	70
100000	—	—	—	100000	700

空气环境中主要应控制的品质除了洁净度之外，还有气流速度、压力和有害气体等。有些内容我们将在后面谈到。

二、 热环境

精密加工和超精密加工所处的热环境与加工精度有着密切的关系。热环境中主要应控制的品质为温度和湿度。

在环境温度发生变化时，首先会影响加工设备的精度。例如一台镗床在 20℃ 时进行精度检验完全符合标准，但在 −10℃ 和 35℃ 时进行精度检验则会发生许多检验项目超差。这主要是因为床身铸件在 −10℃ 时变成中凹形状，而在 35℃ 时又变成中凸型状，最大翘曲量可达 7～11μm。另外温度不均匀也会影响加工设备的精度。例如一台安装在窗户附近的机床，局部受到阳光的照射而使机床相对的两面产生 10℃ 的温差，机床变形可达 0.14mm/m，这种变形是从太阳光照入开始出现，到 11 点钟左右达到最大。

温度的变化不仅影响机床的几何精度，而且还会影响工件的加工精度。例如在加工 3m 长的滚珠丝杠时，磨削后的温升为 1℃，丝杠就会由于温升而伸长 0.033mm，这显然严重影响高等级要求的丝杠生产。因此对于精密零件的加工，必须严格控制温度变化。

在环境温度稳定的情况下，一般来说零件的形状及各形面之间的相互位置关系也不变。如 90°角尺在 20℃ 时有 0.3″的误差，那么在 30℃ 时也是 0.3″的误差；平板在 20℃ 时是平的，那么在 30℃ 时也是平的。但是如果两个相配合的偶件，其材料不同，在 20℃ 时配合良好，而在 30℃ 时就可能发生配合性质的改变，使设备性能发生变化。

长度精密测量是精密和超精密加工的重要保证手段，长度的精密测量必须在特定的条件下才能正常进行，其中温度是一个重要的条件，任何物体不论是内部还是外部温度不均衡，都会引起尺寸的变化。如果在没有具体说明温度条件的情况下去说明物体的精确长度是没有意义的。

国际上采用20℃做为进行长度测定的标准温度。进行长度比较的两个物体的线膨胀系数值相差越多，就要求这两个物体的温度更准确地等于20℃，否则将引起测定误差，其值为

$$\Delta L=L[\alpha_{量}(\theta_{量}-20)-\alpha_{工}(\theta_{工}-20)] \tag{9-1}$$

式中 L——被测零件的长度，单位为mm；

$\alpha_{量}$——量具的线膨胀系数；

$\theta_{量}$——量具的温度，单位为℃；

$\alpha_{工}$——工件的线膨胀系数；

$\theta_{工}$——工件的温度，单位为℃。

我们可以看出，当量具温度与工件温度相同时，有

$$\Delta L=(\alpha_{量}-\alpha_{工})(\theta-20)L \tag{9-2}$$

式（9-2）说明要使测定误差 $\Delta L\doteq 0$，则必须使 $\alpha_{量}=\alpha_{工}$ 或 $\theta=20$℃。我们不可能针对各种不同材料工件制造相应的长度标准尺，那么标准温度的控制就更加重要了。它决定了精密和超精密加工所能达到的精度极限。因此，在严格控制的恒温条件下进行加工和计量是精密和超精密加工的重要条件之一。

所谓恒温条件主要以两个指标来进行衡量，一个是恒温基数，也就是指空气的平均温度。另一个是恒温精度，也就是指相对于平均温度所允许的偏差值。我国规定的计量标准温度为20℃，一般来说精密和超精密加工及装配的温度环境也以20℃为宜。但由于加工、装配常常占用非常大的空间，维持恒温比较困难。尤其是由于地理位置不同或同一地理位置的季节不同，大气温度差别非常大，不分地区、不分季节统一规定恒温基数，会大大增加投资和浪费能源。因此很多精密和超精密加工车间的环境温度实行了按季节调温的办法。如夏天把温度基数定为24℃，冬天定为17℃，只有春、秋两季定为20℃。大量的分析研究、试验应用和实地调查证明，除了有特殊精度要求的情况外，一般的精密和超精密加工场合，主要是要求温度波动和恒温区内各处温差应小些。所以在适当场合对于恒温基数采用按季节调整温度是有益的。

恒度精度主要取决于不同的精密和超精密加工的精度和工艺要求。总的来说，加工精度要求越高，对温度波动范围的要求越严格。恒温精度一般分为0.2级、0.5级、1级和2级等四个等级。分别代表恒温精度为±0.2℃、±0.5℃、±1℃和±2℃。如对于一级精度坐标镗床的精调与校验环境可以取±1℃，而对于高精密度的微型滚动轴承的装配和调整工序的环境就可以取±0.5℃。

随着现代工业技术的发展与精密和超精密加工工艺的不断提高，对恒温精度也提出了越来越高的要求。例如在大规模集成电路元件生产过程中的光刻曝光工序，要求掩膜板材料（一般是玻璃）与硅片的热膨胀系数的差别越来越小，因为当直径为100mm的硅片的温度上升1℃的时候，就会引起0.24μm的线性膨胀，显然这是不能允许的，所以相应提出了±0.1℃恒温精度的要求。当前已经出现了±0.01℃的恒温环境，它的维持需要采用许多特殊措施，如把整个设备浸入恒温油槽之中，加工区域增加保温罩等，在一个普通恒温精度的基础上，创造一个比较高恒温精度的局部环境。

精密和超精密加工对环境的相对湿度也有一定的要求，所谓相对湿度是指空气中水蒸汽分压力和同温度下饱和水蒸汽分压力之比。它反映了湿空气中水蒸汽含量接近饱和的程度。相对湿度值小，表示空气离饱和程度远，空气较为干燥，吸收水蒸汽能力强；相对湿度值大，表示空气接近饱和程度，空气较为潮湿，吸收水蒸汽能力弱。

湿度过高会产生许多对精密和超精密加工不利的因素。相对湿度超过50%时会使机床和仪器发生锈蚀，光学镜头出现霉斑，严重影响仪器设备的性能。相对湿度超过55%时会使冷却水管壁上出现结露现象，假如是发生在精密装置的电路系统当中，将是引发各种事故的隐患。湿度太高时，空气中的水分子将把硅片表面粘着的尘埃化学吸附在表面上而难于清除，图9-1给出的是关于硅片上吸附的10μm直径以上的尘埃，用空气吹也去除不掉的比例的调查结果。由图可知，湿度越高，吹不掉的比例也越高。

在实际生产当中，相对湿度过低也不利于精密和超精密加工。当相对湿度低于30%时，有些材料由于干燥而变脆和易燃；静电力的作用使尘埃更易吸附于物体表面；某些半导体器件容易发生击穿。所以一般情况下，相对湿度应控制在35%到45%之间。湿度的波动范围相应规定了±10%、±5%和±2%几个等级。当前精度要求非常严格的某些半导体工业已经需要将湿度波动范围控制为1%，而且今后会更加严格。表9-5给出了美国209B标准温度和湿度的控制建议。

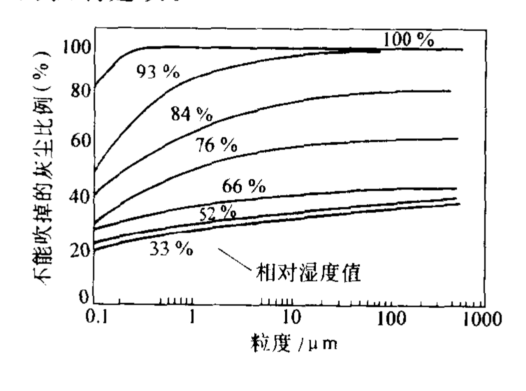


图 9-1　湿度对尘埃粘附的影响

表 9-5　温度和湿度的控制建议

	温度/℃			湿度/（%）		
	范围	推荐值	波动值	最高	最低	波动值
美国209B标准	19.4～25	22.2	±2.8 特殊需要时为±0.28	45	30	±10 特殊需要时为±5
趋势			±0.1	45	30	±2

三、洁净室

洁净室是指将室内空气中尘埃微粒、温度、湿度、压力流速和气流的分布形式及其形状等控制在一定范围内的房间。它为精密和超精密加工提供了必需的空气环境和热环境，是整个支撑环境的重要基础设施。

1. 实现空气净化的基本要求

（1）发尘量要小　包括尽量不带尘埃进入洁净室和在净化区域内不产生尘埃两个方面。操作人员应穿无尘工作服并经专门设置的“风淋室”后再进入洁净室，所携带的工件及物品必须予先认真洗净并经由特设的物品传送箱送进洁净室，防止未净化的空气混入洁净区。尽量缩短操作人员的作业路线，不做多余无用的动作，限制尘埃的产生。

（2）及时排除尘埃　洁净室内只要有作业操作，就不可避免地会有尘埃产生。重要的是不让产生的尘埃停留和扩散，及时加以排除。为了保证这一点，内部装修应尽量选用难以积存尘埃的不易带静电的材料，防止尘埃吸附停留。在易产生尘埃微粒的区域附近进行排气，防止尘埃扩散形成二次污染。

（3）供给洁净的空气　所谓尘埃，一般以0.5μm为基准，用普通的空气过滤方法是不能去除掉的。适合精密和超精密加工要求的洁净室一般使用HEPA (High Efficiency Particulate Air Filer) 超高性能过滤器，以保证洁净空气的供给。虽然洁净室的密封性有严格要求，但总难免有泄漏，为了保持与外界有一定的压差和及时排除尘埃，不断地送入洁净的空气是实现

和保持洁净度的最基本措施。

2. 空气过滤器

空气过滤器是空气净化的关键设备。过滤器的性能指标主要有效率、阻力、容尘量、风速和滤速等。

过滤效率是较为重要的指标，它是指在额定风量情况下，过滤器捕获的尘埃量与过滤器前进入过滤器的尘埃量的百分比。由此可得过滤器效率 η 为

$$\eta=\frac{Vc_1-Vc_2}{Vc_1}\times 100\%=\left(1-\frac{c_2}{c_1}\right)\times 100\% \tag{9-3}$$

式中 V——通过过滤器的风量；

c_1——过滤器前的空气含尘浓度；

c_2——过滤器后的空气含尘浓度。

过滤器的阻力是另一个较为重要的指标，用压力降 ΔH 来表示。它随过滤器通过的风量大小而变化，评价时是指额定风量而言的。显然，随着过滤器的使用时间增加，其阻力也会因尘埃滞留而不断加大。通常把未粘尘的新过滤器的阻力称做初阻力，把需要更换的过滤器的阻力叫做终阻力。一般情况规定终阻力为初阻力的两倍。

常用的过滤器可以分为粗效过滤器、中效过滤器和高效过滤器等几种。它们的主要性能如表 9-6 所示。

从表中可以看出，粗效过滤器只能滤掉较大颗粒尘埃，适用于一般净化要求的情况。对于有中等净化要求的情况应设置粗效和中效两道过滤器；对于有超净要求的情况，则至少应设置三道过滤器，前两道为粗效和中效过滤器，作为予过滤系统，以减轻末级过滤器的负担，延长高效过滤器的使用寿命。

要求洁净度在 10 级以上的超级洁净室，须使用一种更高性能的 ULPA (Ultra Low Penetrafion Air) 过滤器作为末级过滤器，它捕集 0.1μm 直径尘埃的效率达 99.999%以上。

高效过滤器用纸状超细玻璃纤维和超细石棉纤维作为过滤材料，孔隙非常小，过滤效率很高。为减少阻力，就必须增大过滤面积，将过滤纸往返多次折叠，如图 9-2 所示 HEPA 高效过滤器的结构形式，能使实际过滤面积达到过滤器断面面积的 60 多倍。

表 9-6 空气过滤器的分类

类　别	有效的捕集尘埃直径/μm	计数效率（%）对直径为 0.3μm 尘埃	阻力/Pa
粗效过滤器	>10	<20	≤30
中效过滤器	>1	20～90	≤100
亚高效过滤器	<1	90～99.9	≤150
0.3μm 级过滤器	≥0.3	≥99.91	≤250
0.1μm 级过滤器	≥0.1	≥99.999（对直径为 0.1μm 尘埃）	～250

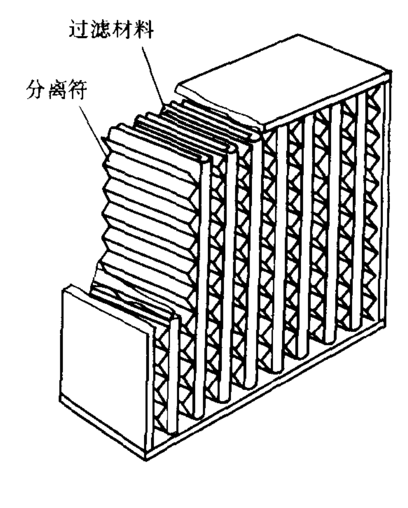


图 9-2 高效过滤器 (HEPA)

3. 气流组织

洁净室的气流组织的主要作用是把已有的尘埃尽快而有效地排出去，并阻止外界尘埃进入。在此过程中要防止尘埃二次飞扬，以减少尘埃对工艺过程的污染。工作区的气流速度应满足空气洁净度的要求。

洁净室的气流组织型式主要有乱流和层流两种型式。

（1）乱流型式　乱流型式是将净化的空气由顶棚送进室内，再由地面或接近地面的墙壁处回气，气流自上而下，与尘埃的重力沉降方向一致，见图9-3。它是用洁净的空气稀释室内尘埃的浓度，逐渐排出室内尘埃而达到净化要求。由于空气流向不同，所以称作乱流型式。它的单位时间内的换气次数是一个比较重要的指标。要保持1000级水平，每小时需换气60～70次以上。同时为了避免吹起表面尘埃而造成再污染，一般将吹过水平表面的气流速度控制在0.2m/s以下。乱流型式受到送风口和回风口布置和结构的限制，尘埃可能随乱流向任一地点扩散，只能维持洁净度1000～100000级的水平。但是乱流型式的洁净室的建设费用和运行费用都较小，因而应用广泛。

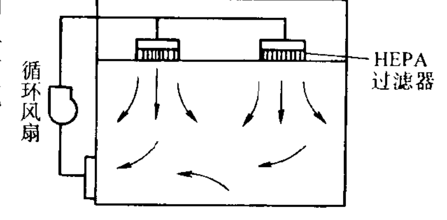


图9-3　乱流型式

（2）层流型式　层流型式是使室内的气流流线几乎平行，以均匀的速度向一个方向流动，没有涡流产生。气流速度可以参考美国209B标准，采用0.45m/s。由于气流速度与通风量有关，气流速度越大，所要求的通风量就越大，能源消耗也相应加大。为了能既满足空气净化的要求，又节约能源，有人提出了各种不同情况下控制污染所需的最低风速如表9-7。层流型式中净化的空气直接流过作业区冲洗尘埃，可得到非常高的洁净度，达100级或更高，而且这种系统一般启动后1～2分钟就可以达到要求的洁净度。但其建设费用和运行费用都比较高，只有在必要时才采用。

层流型式又分为垂直层流方式和水平层流方式。

1）垂直层流方式　垂直层流方式的特点是在洁净室整个顶棚上装满高效过滤器，整个地面布满回风口，送入室内的洁净气流充满整个洁净室断面，流速均匀，象“活塞”一样把室内的尘埃迅速压下排走，如图9-4。整个洁净室就成了高洁净度的环境。

表9-7　下限风速

洁净室	下限风速 / $(m \cdot s^{-1})$	条　　件
垂直层流	0.12	无人或很少有人进出，无明显热源
	0.3	无明显热源的一般情况
	≯0.5	有人，有明显热源
水平层流	0.3	平时无人或很少有人进出
	0.35	一般情况
	≯0.5	要求更高或人员进出频繁的情况

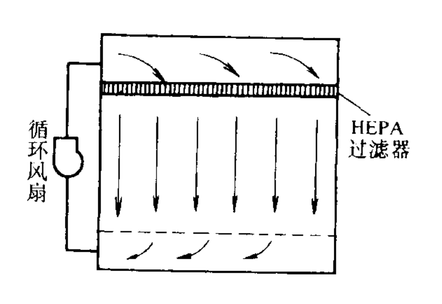


图9-4　垂直层流方式

2）水平层流方式　水平层流方式的特点是在一侧的整个墙面上装满高效过滤器，将相对的另一侧的整个墙面作为回风口。送入室内的洁净气流以水平方式通过洁净室断面，完成排除尘埃的任务，如图9-5。由于水平层流方式气流方向与尘埃沉降方向不一致，所以其断面风

速应略大于垂直层流方式气流的断面风速，以减轻尘埃沉降现象的影响。室内沿气流方向和从上到下方向洁净度逐渐降低，在加工作业的安排与布置时应加以考虑。

4. 正压控制

外部空气渗入洁净室是影响室内洁净度的重要原因。为了保持室内环境的洁净度和温湿度，防止外界空气渗入，需要保持室内具有一定的正压，如图 9-6。室内正压是靠送入风量大于排出风量达到的。较高的正压值，虽然有利于防止外界空气渗入，但所需新风量加大，缩短了高效过滤器的寿命，增加了能量消耗和运行费用。所以应使室内正压值维持在规定的合理值内。必要的压力差随不同的场合有所不同，基本情况如表 9-8 所示。

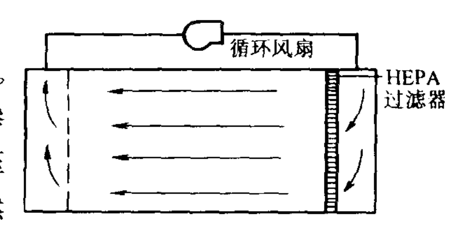


图 9-5 水平层流方式

由于系统运行过程中各级过滤器积尘量的不断增加使过滤器阻力也随之加大，室内压力也会产生变化，所以必须采取措施进行压控制。最简单的方法是在回风口上安装空气阻尼层如尼龙布或泡沫塑料等，以增加室内压力。较常用的方法是安装余压阀或差压式电动风量调节阀等压力调整装置。

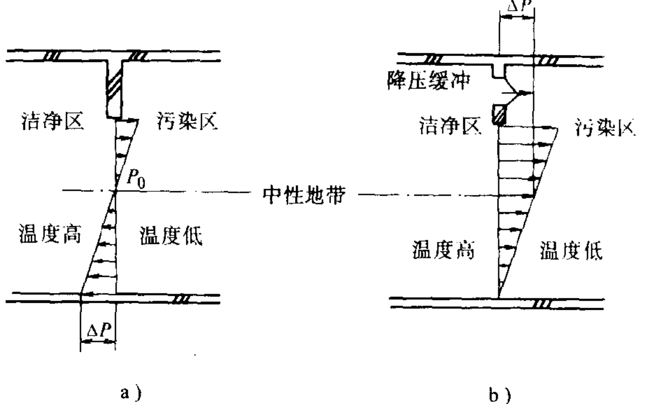


图 9-6 因温度差产生的开放部气流

a) 有污染 b) 无污染

5. 温度和湿度的控制

在洁净室内，精密和超精密加工过程中消耗能量转变成的热和操作人员身体散发出的热是影响恒温环境的主要内部因素；洁净室外的温度与室内温度不一致而产生的热传递是影响恒温环境的主要外部因素。恒湿也有类似的主要影响因素。因此洁净室的恒温、恒湿控制是要随时进行的。空气调节系统就是解决这一问题的关键设施。

表 9-8 必要的压力差

相应的场合	最低压力差/Pa
不同级别洁净室相互之间	4.9
洁净室与准洁净室之间	9.8
洁净室与一般工作室之间	14.7

空气调节系统中有许多空气处理设备，其中包括空气加热设备、冷却设备、加湿设备和减湿设备。除了空气电加热器及使用固体吸湿剂的设备外，多数是空气与其它介质的热湿交换设备。水、水蒸汽、液体吸湿剂和制冷剂都能被做为热湿交换的介质，通过直接接触方式或表面式热湿交换方法进行温湿度控制。表 9-9 所示为温湿度控制系统。室内采用电子温度传感器，由出口露点传感器控制加湿器，用电子调节器控制空调机。

表 9-9 温度、湿度控制系统

控制幅度	空调机的控制	热源控制
±0.1°C ±2%	电加热器的再热控制吹出气体的温差 1°C 以内	送水温度固定±1°C
±0.5°C ±5%	温水管再热控制吹出气体的温差 5°C 以内	送水温度固定±1°C
±1.0°C ±10%	温水管再热控制吹出气体的温差 10°C 以内	送水温度固定±2°C

四、分层次的局部环境

精密和超精密加工要求的支撑环境因行业不同而有所不同，即使是同一种行业，不同工序要求的环境也不相同。某

一产品的生产常常同时需要有普通环境、精密环境和超精密环境。在具体实现这些环境时，不是分别单独设置，而是采取逐层提高的办法。即在建设恒温洁净室时，规划成一层套一层的局部环境结构，最外层是一般环境，往里一层是精密环境，套在一般环境之中，越是里层，恒温精度和洁净度等级越高。最里层是恒温精度和洁净度等级最高的超精密环境。这样做可以使得超精密环境容易达到，而且相对来说节省费用，同时相当于在超精密环境外面设置了多层保护层，提高了安全性和可靠性。在安排生产工艺流程时，要使物质流向从一般环境向精密、超精密环境逐层流动，尽量避免物流方向的交叉，对维持超精密环境是十分必要的。

在精密和超精密加工中，象高精度半球面金刚石车削和硬磁盘涂层表面高点铲刮等，切削加工区域的温湿度和洁净度常常是很难控制的。针对这些情况可以采用更为局部的恒温和净化措施。

安装在恒温洁净室内的高精度非球面金刚石车床整体被透明塑料罩子罩起来，内部设有多个喷嘴，将大量的经过精细的恒温处理的冷却油从上面喷淋到机床的各个部位，使加工区域的温度保持在 20±0.1°C 的范围内。流回油箱的油流不仅带走了机床运转和切削加工产生的热量，同时也带走了切屑和尘埃。这是一个典型的采用设备局部恒温的例子。

计算机硬磁盘涂层表面高点铲刮仪安放在 1000 级的洁净环境内，高速旋转的磁盘与宝石铲刮头块之间的间隙控制在 0.4μm 左右，表面上 0.4～0.8μm 高的凸起物不断地被铲刮头块撞击下来形成尘埃，必须随时清除才能避免安装在铲刮头臂上的声发射高点检测装置发生误极信号。于是在磁盘和铲刮头臂外围增加了一个有机玻璃外罩做为局部洁净腔，通过高效过滤器送入洁净的空气使腔内达到 100 级的洁净度，保证了磁盘高点铲刮工序的顺利进行。这是一个典型的采用加工区局部净化的例子。

第二节 振动环境

一、振动干扰的影响

精密和超精密加工对振动环境的要求越来越高，限制越来越严格。这是因为工艺系统内部和外部的振动干扰会使得加工和被加工物体之间产生多余的相对运动而无法达到需要的加工精度和表面质量。例如在精密磨削时，如果有振动干扰会产生多角形的轮廓形状而影响加工精度，表面粗糙度也达不到镜面要求。只有将磨削时的振幅控制在 1～2μm 时，才可能获得 R_a0.01μm 以下的表面粗糙度。当然这就必须控制外界振动干扰引起的振幅和机床空运转时的振幅比这个数值还要小得多。

精密和超精密加工的质量不仅与振动干扰的振幅有关，而且与振动干扰的频率有关。较高频率的振动能被工艺系统滤除一部分，但小于 70Hz 的振动干扰严重地影响加工表面质量。所以较低频率振动的振幅应控制在 0.125μm 以下，而较高频率振动的振幅应控制在 0.25μm 以下。尤其是类似放置超过 100 万倍电子显微镜的设施和刻线宽度为亚微米级的半导体加工设备等，对微小的振动干扰也极为敏感，更要特别注意对振动干扰的控制。

在一般情况下，对精密和超精密加工构成威胁的微振动，其振动加速度为 $2\times10^{-2}m/s^2$ 以下，振动振幅为 5μm 以下，频率在 0.5～70Hz 之间的情况较多，这种微小振动是属于所谓暗振动，即“常时振动”的范围，主要来自于：

1）室内振动：人员行走产生的振动
设备振动产生的振动
物料搬运产生的振动
辅助设施产生的振动

2）室外振动：交通运输产生的振动
工厂生产产生的振动
建设施工产生的振动
辅助设备产生的振动

3）自然界振动：常时微动及风等

这些微振动源通过不同的途径传播到精密和超精密加工区域而产生影响。所以必须在搞清主要振动源的基础上，分析它们可能的传播途径，采取积极的预防和隔离措施，以消除振动干扰的影响，保证精密和超精密加工对振动环境的要求。

二、振动干扰的消除

为保证精密和超精密加工的正常进行，必需采取有效措施消除振动干扰的影响，其主要途径如下：

1、内部振动干扰的消除——防振

所谓内部振动干扰是指工艺系统内部自己产生的振动干扰，这是振动干扰最重要的部分，如果内部振源没能消除，外界环境再好也是无济于事的，所以首先要防止工艺系统内各部份产生振动干扰。

（1）提高设备回转零件的动平衡精度　砂轮、带轮、齿轮、转轴等在工作时高速回转的零部件，经常存在不平衡力和力偶，这是产生内部振动干扰的基本原因。只有通过精细的静、动平衡之后，才能消除由于离心力而引起的振动干扰。另外要特别注意回转零件的加工精度和消除回转零件之间的装配间隙，因为加工误差和装配间隙都会产生不平衡力和力偶。

（2）减少设备传动系统的振动干扰　在必要时应对驱动电动机的转子进行动平衡；轴承零件应当进行精化处理。为了减少传动带的振动，应尽量选用厚度均匀的薄型带，柔软的平带比较硬的V带要好；单根带比多根带好。

（3）减少液压系统的干扰　精密和超精密加工设备常常使用液压系统做为驱动和控制的动力源。由于油泵的高速回转，难免产生振动干扰，而且大部分油泵的工作状况决定了液压是波动的。为了减少液压系统的振动干扰，一般把液压站与设备分开，放置于隔振良好的基础上。同时采用高性能的储能器以减少液压的波动。

（4）提高加工设备的抗振性　提高加工设备的静刚度是增加抗振性的重要措施，包括提高设备的整体刚度、局部刚度和接触刚度。这样有助于提高系统的固有频率和降低振动振幅，无论对抵抗强迫振动还是抵抗自激振动都是十分有效的。另外还可以用将砂芯封留在大型铸件内部、合理安排加强筋的分布等办法增大阻尼系数，改善设备的动刚度，有效地提高设备的抗振性。

2. 外界振动干扰的消除——隔振

外界振动干扰常常是独立存在而不可控制的，如交通运输产生的振动干扰和建设施工产生的振动干扰等，尤其是自然界存在的常时微动和风产生的振动等干扰，只能采取各种隔离

振动干扰的措施，阻止它们传播到工艺系统中来。

最基本的隔振措施是采取远离振动源的办法，事先对场地外的铁路、公路等振动源进行调查，必须保持相当的距离。在建设布局上把动力房、空调机室等设施与加工场地距离尽量远一些，使对振动敏感的设备不受影响。

精密和超精密加工的隔振措施常常是多层次的。首先洁净室甚至整个车间都应当建筑在一个良好的隔振地基上，然后在这个隔振地基的基础上再安放隔振的弹性材料或隔振元件，以达到更好的隔离振动干扰的目的。

三、隔振器的隔振原理

在精密和超精密加工中，常用隔振器把加工设备与地基隔离开，以避免外界振源对加工精度的影响，用隔振器把加工设备与外界振动干扰隔离开来的方法称为设备的隔振。

为了讨论简化，把隔振器的隔振基本原理用单自由度振动系统力学模型加以说明，如图9-7所示。

假定加工设备的弹性不计，其质量为 m，而隔振器的质量不计，其刚度为 K、阻尼系数为 c。外界振动干扰源为垂直振动 $x_0=a\sin\omega_j t$，按单自由度强迫振动可以推导出以下关系

$$A=\frac{a\sqrt{1+(2\zeta\lambda)^2}}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2+(2\zeta\lambda)^2}} \quad (9\text{-}4)$$

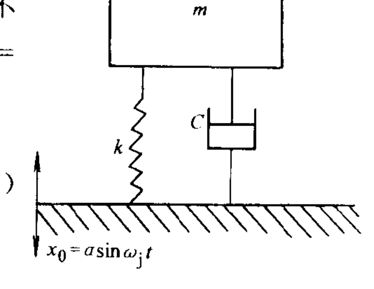


图 9-7 单自由度隔振系统的力学模型

式中 A——为加工设备的振幅，单位为 mm；

a——为外界振动干扰的振幅，单位为 mm；

ζ——为阻尼比或衰减系数比；

λ——为频率比 $\lambda=\frac{\omega_j}{\omega_n}$

ω_j、ω_n——分别为振动干扰频率和系统固有频率，单位为 Hz。

隔振效果用被隔振加工设备的振幅 A 与外界振动干扰的振幅 a 的比 η 来表示，称为隔振系数或振动传递率，故有

$$\eta=\frac{\sqrt{1+(2\zeta\lambda)^2}}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2+(2\zeta\lambda)^2}} \quad (9\text{-}5)$$

如果忽略阻尼，即 $\zeta=0$ 时，则振动传递率为

$$\eta=\left|\frac{1}{1-\lambda^2}\right| \quad (9\text{-}6)$$

图 9-8 表示了此时的振动传递率和振动频率比的关系。

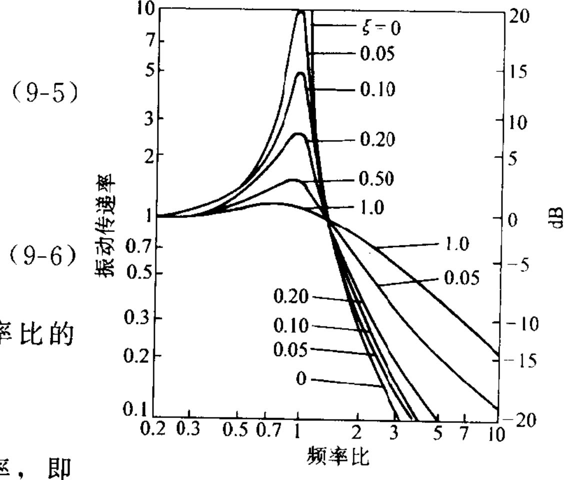


图 9-8 振动传递率曲线

由式（9-6）和图 9-8 可以看出：

1）当外界振动干扰频率小于系统固有频率，即 $\lambda<1$ 时，则 $\eta>1$。这时的振动干扰力全部通过减振器传给加工设备，不能起到应有的减振作用。

2）当外界振动干扰频率等于系统固有频率，即$\lambda=1$时，则η趋于无穷大，整个系统发生共振。这时不仅起不到减振作用，反而会加剧系统的振动。

3）当外界振动干扰频率与系统固有频率的比$\lambda>\sqrt{2}$时，则$\eta<1$。只有在这时候，减振器才起到减振作用。

因此，要想取得理想隔振效果，就必须使选用的弹性支承的固有频率满足$\lambda>\sqrt{2}$的条件。虽然从理论上讲λ值越大，η值越小，隔振效果越好。但实际上$\lambda>3$以后，隔振效果变化并不十分明显，同时λ值大，隔振器的静扰度就大，装置稳定性差，造价还高，所以工程上一般λ值取3左右。

四、隔振元器件

按上述隔振原理，工程中实施的隔振措施，大都是通过在机床设备和地基之间放置弹性支承来实现的。这些弹性元件主要有隔振垫层和隔振器。它们的主要作用在于都具有一定刚度，可以产生一个与振动干扰位移成正比的恢复力；同时又都有一定阻尼，可以产生一个与振动干扰速度成正比的阻尼力，如果使作用在地基上的这两个力的矢量和变得很小，由设备振动时的惯性力部分地抵消外界振动干扰，即可达到积极隔振的目的。设计良好的弹性支承能吸收大部分的外界振动干扰，加工设备依靠自身的惯性保持基本不动。

1. 隔振垫层

最简单的隔振措施是选择合适的弹性材料做为隔振垫层。根据弹性材料的允许荷载、动态弹性系数和振动干扰的频率等条件，选择合适的弹性材料种类、厚度等参数；根据机床设备的总质量，选择弹性材料的横截面积或垫层个数。

常用的隔振垫层弹性材料有软橡皮、中硬橡皮、海绵橡胶、孔板状橡胶、天然软木、软木屑板、毛毡、玻璃纤维及泡沫塑料等。它们没有确定的形状和尺寸要求，一般是根据具体情况来拼排和裁剪的。

2. 隔振器

隔振器是经过专门设计、制造的具有确定规格形状和减振功能的弹性元件。常见的隔振器有弹簧隔振器、橡胶隔振器、弹簧与橡胶组合隔振器和空气弹簧隔振器等。

（1）弹簧隔振器　弹簧隔振器是由一个或几个相同的金属弹簧、定位块、螺栓和外罩等零件组成的，其中弹簧是关键隔振弹性元件。由于它的承载能力强、静载压缩量大，固有频率低，不仅隔振效果好，而且性能稳定可靠，因此应用十分广泛。

（2）橡胶隔振器　橡胶隔振器是由耐油的防振橡胶，内外金属环和防护外罩等零件组成的。其中防振橡胶是关键隔振弹性元件。虽然它的承载能力、静载压缩量和固有频率等性能参数都比不上金属弹簧，但由于它的阻尼很大，对高频成分的隔离性能好，安装、更换都比较方便，有良好的隔振效果，而且价格便宜，因此应用也十分广泛。

（3）弹簧与橡胶组合隔振器　弹簧与橡胶组合隔振器是由金属弹簧、防振橡胶、定位块、金属环和防护罩等零件组成的。其中金属弹簧和防振橡胶是关键隔振弹性元件。它既具有弹簧隔振器的承载能力强、固有频率低的特点，又具有橡胶隔振器阻尼大的特点。在结构上常采用的有弹簧与橡胶并联布置和串联布置两种形式。有的是在金属弹簧上包涂上一层防振橡胶，或将防振橡胶插入盘簧内部，可以有效地消除传递到弹簧本身的高频成份。因此当采用

橡胶隔振器不能满足要求，而采用弹簧隔振器又阻尼不够时，可以采用弹簧与橡胶组合隔振器。

(4) 空气弹簧隔振器 空气弹簧隔振器是由空气、橡胶和外罩等零件组成的。其中空气和橡胶是关键隔振弹性元件，它是将普通空气打入用橡胶材料做成的波纹管中，利用空气的弹性达到隔振的目的。它的固有频率可以做到很低，具有在载荷变化时固有频率可保持不变的特点。有的空气弹簧隔振器的高度可以通过注入空气的多少来进行调整，由于空气和橡胶的特性，对高频成份的隔离性非常好，因此适用于防止微振的情况，特别是精密和超精密加工设备的防振。它的主要缺点是结构比较复杂，价格比较贵。

3. 有源控制器

在单自由度振动系统中，设质量为 m，阻尼系数为 c，刚度为 k，振动干扰的外力为 F，则其运动方程可表示为

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=F \tag{9-7}$$

在这个方程式中，表示了振动状态所有的力及它们之间的关系。其中左边第一项是质量与加速度的乘积表示惯性力，第二项是阻尼系数与速度的乘积表示衰减力，第三项是刚度与位移的乘积表示弹性力。左边所有力的和与右边的振动干扰外力相等。由此可见如果能控制住所有这些力，就可以控制住振动。这就是振动有源控制的基本思想。

图 9-9 是一个使用补偿质量的有源控制示例。它通过位移传感器获得控制量信息，由专门的控制器以该信息为基础输出相应的控制信号使动作器产生附加的控制力来达到减振目的。

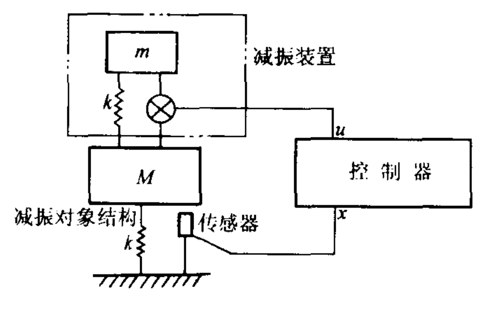


图 9-9 使用补偿质量的有源控制示例

这种有源控制器目前已有商品出售，而且能够实现 3 个轴方向的控制。但由于使用电子控制、结构复杂，所以价格十分昂贵，而且受控制力的限制，使被减振的设备的重量必须控制在一定范围内，因此实际应用还很少。

第三节 噪声环境

一、噪声及其影响

所谓噪声是指使人烦恼和对工作有妨碍的声音。它是由各种不同频率和声强的声音杂乱无章地组合而成的。现代工业生产和施工建设以及交通运输等生产活动，使噪声污染已经成为一个严重问题。图 9-10 表示了不同情况的噪声大小和对人及工作的影响。

对精密和超精密加工来说，操作者长时间在封闭的洁净室中工作，人的情绪受噪声的影响将更为严重，因此必须重视噪声的影响。

衡量洁净室噪声的主要指标是：

(1) 把噪声使人产生的烦恼情绪分为极安静、很安静、较安静、稍嫌吵闹、比较吵闹和极吵闹七个等级。最后两级属于高烦恼水平。在同一环境中的高烦恼人数与总人数的百分比为高烦恼率，一般不应超过 30%。

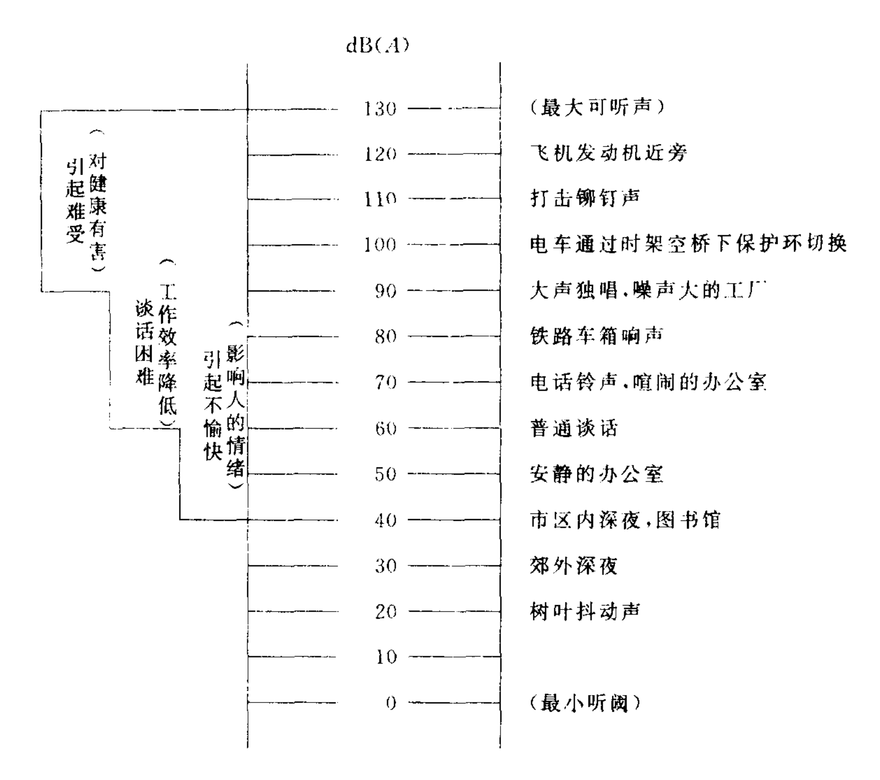


图 9-10 噪声公害与噪声标准图解

(2) 从三个方面评价噪声对工作效率的影响，它们是集中精神高影响率、动作准确性高影响率和工作速度高影响率。一般噪声在 70dB 以下时对工作效率影响不大。

(3) 把噪声对综合通讯的干扰分为清楚或满意、稍困难、困难和不可能四个等级。资料表明在 65dB 以下时，能保证一般通话。

表 9-10 给出了洁净室噪声的判断指标。一般在动态时不超过 70dB(*A*)，最高不超过 75dB(*A*)、空态时乱流洁净室不超过 60dB (*A*)、层流洁净室不超过 65dB (*A*)。

表 9-10 噪声判断指标

洁净室分类		中心频率/Hz								*A* 声级
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
		声压级/dB								
空态	乱流	79	70	63	58	55	52	50	40	≤60
	层流	83	74	68	63	60	57	55	54	≤65
动态		87	78	72	68	65	62	60	59	≤70～75

二、噪声源

工业生产中常见的噪声主要有空气动力噪声、机械噪声和电磁噪声。

空气动力噪声是由于空气流动时非稳态的压力突变引起空气振动而产生的。洁净室的空气动力噪声主要来自各种风机，送、排气装置和使用压缩空气为动力的装置等。

机械噪声是由于机械设备的各个部件受外力后引发的固体振动而产生的。洁净室的机械噪声主要来自加工设备及其辅助机械设施。另外还有机件之间互相碰撞而产生的撞击噪声。

电磁噪声是由于电动机和某些电器内部空隙交变力的相互作用而产生的。洁净室的电磁噪声主要来自加工设备的驱动电动机、继电器、电磁铁等装置。这种噪声常常是持续不断的，很容易引起人的烦恼情绪。

另外还有一种所谓固体噪声，它是由于各种物体的振动传播到洁净室的基础、墙壁、顶棚和其它结构而引起振动，并以弹性波的形式沿建筑结构传播到其它房间去，使相邻的空气发生振动而产生噪声。洁净室的固体噪声主要来自建筑物传递的弹性波。

由此可见要改善噪声环境，就必须分析清楚所有噪声源及其不同的传播途径，全部加以控制，才可能取得明显的效果。

三、噪声控制

对噪声进行控制，应首先从噪声源入手，尽量减少噪声源或降低噪声辐射，包括尽可能选用低速低噪声的加工设备和辅助设施；严格控制送风管道等空调系统中的气流速度；使用高质量、高性能的电器元件；远离外界的强噪声源，如公路、工厂、学校等，这些都是控制噪声源的有效措施。其次就是在噪声传播的过程中采取控制措施，它们包括隔声、吸声、消声等方法。

1. 隔声

所谓隔声就是把不能去掉的噪声源单独安放在一个隔声间内或是用隔声罩把它与外界隔离，阻碍噪声传播的方法、例如要对某齿轮箱进行噪声测试，必须把驱动电动机和变速装置安放在测试间以外的地方，并用隔声罩罩好，只是把传动带或其它不产生噪声的传动装置伸入测试间带动齿轮箱，防止驱动动力部分的噪声传播到测试间内影响噪声测试的准确性。

当一定的噪声能入射到隔声结构的隔声壁上时会产生振动并向外辐射噪声，这部分辐射的噪声能称为透射声能。一般来说隔声壁的透射声能与入射声能的比小于几百分之一，大部分噪声能被隔声壁反射回去了。

可以用透射系数 τ 来表示隔声壁的隔声能力。

$$\tau=\frac{W_1}{W_2} \tag{9-8}$$

式中 W_1——透射声波的能量，单位为 N·m；

W_2——入射声波的能量，单位为 N·m。

为了计算方便，也常用透射损失 TL 来表示隔声壁的隔声值

$$TL=10\log\frac{1}{\tau}=10\log\frac{W_2}{W_1} \tag{9-9}$$

从式（9-9）中可以看出，τ 值越小、TL 值越大、隔声效果越好。

实际应用的隔声结构包括房间的墙壁，顶棚、门和窗户等都必须符合隔声要求才能达到控制噪声的效果。

隔声壁的隔声值取决于它的单位面积质量、结构刚性、材料内摩擦特性、噪声频率和与其它隔声结构之间的连结方式等。为了增强隔声效果，可以把中间有空气式填充吸声材料的两层隔声壁组合使用，称为双层隔声壁。它比同质量的单层隔声壁的隔声值要高出一个 ΔTL、双层隔声壁系统的固有频率越低，附加隔声值 ΔTL 值越高。另外它的附加隔声值还与两个单

层隔声壁的厚度比、刚度比及连结方式有关。设计合理的双层隔声壁的附加隔声值一般为8～15dB。

2. 吸声

房间中某一固定点的噪声能除了来自噪声源直接辐射的噪声能之外，还来自房间经周围墙壁和地面、顶棚多次反射的噪声能。如果在房间周围墙壁和顶棚上挂满吸声材料，地面也铺满吸声材料，房间中那个固定点的噪声能就会小的多。这种利用吸声材料控制噪声的方法叫作吸声，是降低加工场地内部噪声普遍采用的方法。

吸声材料除了反射和继续传播一部分噪声能之外，其余部分则被吸收了。这主要是由于吸声材料的多孔性和松散性所至，声波进入材料孔隙，使孔隙中空气和材料产生微小振动，是摩擦力和粘滞力把一部分声能转化为热能而被吸收。

吸声材料的吸声能力大小可用吸声系数 α 来表示。

$$\alpha=\frac{E_2}{E_1} \tag{9-10}$$

式中　E_1——入射到吸声材料上的声能，单位为N·m；

　　E_2——吸声材料吸收的声能，单位为N·m。

从式（9-10）中可以看出，如果声波没有被反射而射入开阔空间全被吸收时，吸声系数 α 为1，而被全部反射时，吸声系数 α 为0，所以吸声材料的吸声系数越接近于1越好。

常用的吸声材料有超细玻璃棉、开孔型聚氨脂泡沫塑料、微孔吸声砖和木丝板等。吸声法降低噪声一般可达10dB左右。

3. 消声

在许多场合可以采用专门的消声器来控制噪声传播。消声器是由吸声材料和按不同消声原理设计的特殊壳型结构组成的。一般按不同的消声原理分为阻性、抗性、共振性和复合性等型式的消声器，大量应用于净化空调系统中。

第四节　其它环境

一、光环境

精密和超精密加工的工作内容大都要求操作者仔细严格，而工作场所又是在密闭的洁净室里，人在黑暗的环境里是无法正常工作的。因此对洁净室的光环境提出了一定的要求。洁净室的照明方式有三种，一是一般照明，它是为整个室内的照明而设置的。二是局部照明，它是为加工区域的照明而设置的。三是混合照明，它是对必要的区域在已有一般照明的基础上增加局部照明而设置的合成照明。大多数的精密和超精密加工场合都是采用混合照明。

光环境有两个主要指标，一个是照度，另一个是眩光。

1. 照度

照度是衡量照明量的指标。它用单位被照面积上接受的光通量来表示，照度单位是lx。

从操作所需精度的角度来看，越是要求精密的操作，照度就应该越高。国外洁净室的照度级别大体上是按照这个规律制订的，一般对精密级以上的操作要求照度在500Lx到1000Lx甚至更高。我国规定无采光窗洁净室工作面上的最低照度如表9-11所示。

调查表明，在天然光源照明情况下工作，照度逐步提高到1000Lx时，精密加工的工作效率一直是呈现提高的趋势。而在人工光源照明时情况就不同了。常常是在300Lx～500Lx时工作效率最高，照度达到1000Lx时效率反而下降了。这主要是因为人工光源照明质量不好，产生令人不舒适的眩光所至。因此理想的照明，最好是采用天然光源辅以人工光源。

表 9-11 最低照度值

识别对象的最小尺寸 d 及场所/mm	视觉工作分类 等级		亮度对比	照度/Lx 混合照明	照度/Lx 一般照明
$d \leqslant 0.15$	Ⅰ	甲	小	2500	500
		乙	大	1500	300
$0.15 < d \leqslant 0.3$	Ⅱ	甲	小	1000	300
		乙	大	750	200
$0.3 < d \leqslant 0.6$	Ⅲ	甲	小	750	200
		乙	大	750	150
$d > 0.6$	Ⅳ	—	—	750	150
通道、休息室	—	—	—	—	100
暗房工作室	—	—	—	—	30

2. 眩光

眩光是衡量照明质量的指标。它是由于在视线附近有高亮度光源、光泽表面反射出高亮度光源和极高的亮度对比等原因形成的。常用眩光常数 G 来表示，下式是表达方式之一

$$G = 4.167 \frac{B_s^{1.6} \omega^{2.3}}{B_b} \tag{9-11}$$

式中 B_s——光源 s 的亮度，单位为新烛光/m²；

B_b——光源以外的背景平均亮度，单位为新烛光/m²；

ω——由眼睛看到光源 s 的立体角，单位为sr。

眩光常数 G 值越小，眩光越弱，人的感觉就越舒服。G 值与眩光引起的不舒适程度之间的关系如表 9-12 所示。

表 9-12 G 值与眩光引起的不舒适程度之间的关系

G	眩光引起的不舒适程度
600	不堪忍受
150	不舒适
35	尚可
8	感觉不到眩光

这就说明了洁净室的照明只注意照度，即明亮度是不够的，如果照明质量不好，象使用裸灯泡、悬挂高度不当、亮度分布不均匀或只有局部照明而没有一般照明，都会造成眩光过强，使得操作人员感到不适甚至不堪忍受而达不到好的照明效果，严重影响工作效率。因此光环境是精密和超精密加工的重要支撑环境之一。

二、静电环境

精密和超精密加工对静电环境的要求是十分严格的。因为在洁净室里有大量容易产生和集聚静电的高电阻率材料，如塑料地面，尼龙墙面、涤纶工作服等。还有大量容易产生和集聚静电的动作和机会，如加工工艺上的搅拌、粘合、研磨、喷涂、清扫等操作；操作工人进行操作时各种动作引起的物体间摩擦；气流与管道、设备机构间的摩擦等。再加上相对来说较为干燥的湿度条件，都对静电环境不利。

产生和集聚的大量静电，有可能导致如下一些事故：

1）静电放电使人受到电击而产生不由自主的动作造成失误，甚至造成触电、碰伤、摔伤等二次伤害。

2）静电放电使元器件击穿，尤其是那些对静电放电十分灵敏的器件，损坏率极高。

3）静电放电产生的光可使胶片不正常感光；静电放电产生的热可使易燃物起火和爆炸；静电放电产生的电磁波可使仪器出现干扰，设备出现误动作。

4）静电本身产生的力可使尘埃微粒吸附于表面而造成制品污染，粉尘堵塞等生产事故。

为减少静电的产生，应当尽量采用抗静电或经过抗静电处理的材料铺设地板、装饰墙壁；用高效的抗静电剂喷涂易产生和携带静电的材料和部位；用不易产生静电或经过抗静电处理布料做操作人员的洁净服。这些都是非常有效的抗静电措施。经过抗静电处理的洁净服比未经过处理的带静电电位可降低 80%，尘埃附着率可减少 90%。

为减少静电的集聚，防止对人的静电电击，应当限制人随时都在接触的室内地面的泄漏电阻，这个阻值越小，人体的静电就越容易从地面泄漏于大地而避免使人遭受电击。另外应特别注意各种情况发生静电电击的界限，如非导体发生静电电击的带电电位为 10kV 左右，而人体发生静电电击的带电电位为 3kV 左右。因此要采取措施使带电物体的电位低于静电电击电位。

以上论述了精密和超精密加工的主要支撑环境，还有很多象电磁波环境、放射线环境等在某些场合对精密和超精密加工也有很大影响，同样需要加以控制，给以必要的重视。

第五节　精密和超精密加工的环境设施

针对精密和超精密加工对各项环境的要求，设计了相应的设施来满足这些要求：针对空气环境，设计了具有控制洁净度、风速、风向、气流压力等功能的洁净室；针对热环境，设计了具有控制温度，湿度功能的恒温室和恒湿室；针对振动环境，设计了具有防振、隔振、消振功能的隔振室；针对噪声环境，设计了隔声、吸声、消声的无响室；针对静电环境、电磁波环境等，设计了相应的防静电室、屏蔽室等。由于各种精密和超精密加工作业和方法对洁净度的要求最为基本，最为普遍，因此在前面较为详细地介绍了洁净室的情况。所有针对各种环境设计的这些设施，都对精密和超精密加工的正常进行起了保证和支持作用。

在实现精密和超精密加工的支撑环境时，应当明确以下几个目标：

1）实现高性能的制造环境空间，它必须满足精密和超精密加工作业的各项严格要求。

2）降低环境设施的原始成本和维持运转这些设施的费用，追求经济性。

3）确保各项性能指标的稳定性，使作业生产能够连续稳定地进行。

4）必须考虑操作者的安全和对周围环境的污染，如噪声、振动、污水和废气等公害。

5）为了适应现代技术的高速发展，环境设施必须要适应制造工艺不断变化的要求。

某种精密和超精密加工作业或方法，通常都会对几种支撑环境提出要求，因此就出现了恒洁净室、恒温防振洁净室、恒温防振无响洁净室等等。这样，随着精密和超精密加工的不断发展，对洁净室的性能和要求将越来越高、越来越多。

图 9-11 给出了一个考虑比较全面的层流式洁净室的剖面设计情况

在这个设计中，从建筑角度看，它的空间利用合理，布置紧凑，无论是空气、水和工作气体的送、回管道安装和照明、电器的布线及维修都比较方便。从功能角度看，除了保证洁净度、温湿度以外，还采取了措施使地面不传播振动，使室内没有噪声，使照明不产生眩光，使人体避免静电电击等，创造了一个较为完全的精密和超精密加工的支撑环境。

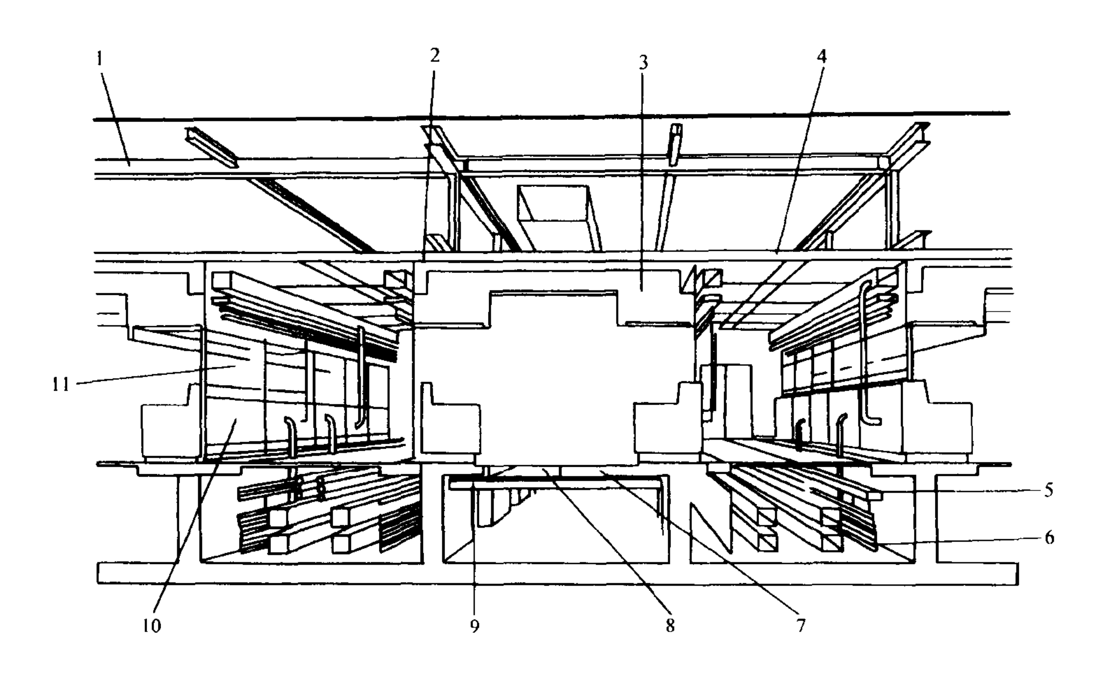


图 9-11　层流洁净室的剖面设计

1—双梁结构法　·方便柔性导管　·容易悬挂净化装置　·顶棚上有便于维修的空间　2—方便起吊净化装置的构件　3—低噪音型洁净单元　4—便于维修检验　5—实用配管　6—排气管　7—防止带静电的筛条　8—不产生闪光的照明　9—非基座工作法　·柔性地板下的有用空间　·不传播走步振动的地面　10—便于实用配管控制盘的安装　11—方便维修控制盘

复习思考题

9-1　精密和超精密加工的支撑环境主要包括哪些方面？对它们的控制要求有哪些？

9-2　什么叫空气的洁净度？空气的洁净度级别是如何规定的？

9-3　精密和超精密加工为什么常常需要在恒温条件下进行？

9-4　恒温环境一般用哪两个指标来描述？目前主要的标准把恒温环境划分为几个等级？

9-5　简要叙述对洁净室的基本要求和实现洁净室的关键技术。

9-6　空气过滤器如何分类？它们的性能指标主要有哪些？

9-7　要实现较高的洁净度等级，气流组织型式应当采用哪一种？为什么？

9-8　洁净室中的温度、湿度和正压力是如何获得和控制的？

9-9　影响精密和超精密加工的振动干扰主要来自于哪些方面？

9-10　消除内部振动干扰的措施有哪些？

9-11　简述隔振器的隔振原理及各种隔振器的特点和应用场合。

9-12　衡量室内噪声的主要指标是什么？影响精密和超精密加工的噪声源有哪几种？

9-13　如何控制噪声？隔声、吸声和消声等方法各有什么特点？

9-14　什么是照度？什么是眩光？怎样才能提高照明质量？

9-15　集聚的静电对精密和超精密加工有什么影响？怎样才能防止静电的影响？

9-16　精密和超精密加工的主要支撑环境设施有哪些？在实施这些设施时追求的目标是什么？

第十章 纳米技术

第一节 纳米技术概述

一、纳米技术的特点

纳米技术平时指纳米级 0.1nm～100nm 的材料、设计、制造、测量、控制和产品的技术。

纳米技术是科技发展的一个新兴领域，它不仅仅是将加工和测量精度从微米级提高到纳米级的问题，而是人类对自然的认识和改造方面，从宏观领域进入到物理的微观领域，深入了一个新的层次，即从微米层深入到分子、原子级的纳米层次。在深入到纳米层次时，所面临的决不是几何上的“相似缩小”的问题，而是一系列新的现象和新的规律。在这纳米层次上，也就是原子尺寸级别的层次上，一些宏观的物理量，如弹性模量、密度、温度等已要求重新定义，在工程科学中习以为常的欧几米德几何，牛顿力学，宏观热力学和电磁学都已不能正常描述纳米级的工程现象和规律，而量子效应，物质的波动特性和微观涨落等已是不可忽略的，甚至成为主导的因素。

二、发展纳米技术的重要性

纳米技术的研究开发可能在精密机械工程、材料科学、微电子技术、计算机技术、光学、化工、生物和生命技术以及生态农业等方面产生新的突破。这种前景使工业先进国家对纳米技术给予了极大的重视，投入了大量人力物力进行研究开发。美国国家关键技术委员会将纳米技术列为政府重点支持的22项关键技术之一，美国国家基金会亦将纳米技术列为优先支持的关键技术。康乃尔等多所大学设立了纳米技术研究开发中心。日本将纳米技术作为优先高技术探索研究项目之一，制定了投资2亿美元进行大规模开发纳米技术的10年计划。筑波交叉学科研究中心将纳米技术列为两个主要发展方向之一。英国成立了纳米技术战略委员会，国家纳米技术计划已开始实施，在Cranfield大学成立了以纳米技术为研究目标的精密工程研究中心。据欧盟委员会最近的调查认为纳米技术在10年后有可能成为仅次于计算机芯片制造的第二大制造业，预测到2010年纳米技术的技术市场价值有可能达到600亿美元。

三、纳米技术的主要内容

纳米技术主要包括：纳米级精度和表面形貌的测量；纳米级表层物理、化学、力学性能的检测；纳米级精度的加工和纳米级表层的加工—原子和分子的去除、搬迁和重组；纳米材料；纳米级微传感器和控制技术；微型和超微型机械；微型和超微型机电系统和其他综合系统；纳米生物学等。

第二节 纳米级测量技术

一、纳米级测量方法简介

纳米级测量技术包括：纳米级精度的尺寸和位移的测量，纳米级表面形貌的测量。在纳

米级测量中常规的机械量仪、机电量仪和光学显微镜等，已不易达到要求的测量分辨率和测量精度；此外接触法测量不但不易达到要求的预期精度，而且很容易损伤被测表面。现在纳米级测量技术主要有两个发展方向，分别介绍如下。

1．光干涉测量技术

这方法是利用光的干涉条纹以提高测量分辨率。可见光和紫外光的波长较长，干涉条纹间距达数百纳米，不符合测量要求。纳米级测量用波长很短的激光或X射线，故可以有很高的测量分辨率。光干涉测量技术可用于长度和位移的精确测量，也可用于表面显微形貌的测量。用这种原理的测量方法有：双频激光干涉测量，激光外差干涉测量，超短波长（如X射线等）干涉测量，基于F-P（Fabry-Perot）标准具的测量技术等。

2．扫描显微测量技术

这方法主要用于测量表面的微观形貌和尺寸。它的原理是用极尖的探针（或类似的方法）对被测表面进行扫描（探针和被测表面实际并不接触），借助纳米级的三维位移定位控制系统测出该表面的三维微观立体形貌。用这原理的测量方法有：扫描隧道显微镜（STM），原子显微镜（AFM），磁力显微镜（MFM），激光力显微镜（LFM），热敏显微镜（TSM），光子扫描隧道显微镜（PSTM），扫描近场声显微镜，扫描离子导电显微镜等。

为对这些纳米级测量方法的测量分辨率、测量精度、测量范围等性能有更好的对比了解，在表10-1中给出了几种主要的纳米级测量方法的测量性能对比。

表10-1 几种纳米级测量方法的对比

	分辨率/nm	精度/nm	测量范围/nm	最大速度/$(nm\cdot s^{-1})$
双频激光干涉测量法	0.600	2.00	1×10^{12}	5×10^{10}
光外差干涉测量法	0.100	0.10	5×10^{7}	2.5×10^{3}
F-P标准具测量法	0.001	0.001	5	5～10
X射线干涉测量法	0.005	0.010	2×10^{5}	3×10^{-3}
衍射光学尺	1.0	5.0	5×10^{7}	10^{6}
扫描隧道显微测量法	0.050	0.050	3×10^{4}	10

双频激光干涉法测量长度和位移，激光外差干涉法测量表面的三维微观形貌，在本书第五章中已有较详细的讲述，这里不再重复。下面将讲述其他几种纳米级测量技术的原理和方法。

二、Fabry-Perot标准具的测量技术

基于F-P标准具的测量技术具有极高的灵敏度和精度，其核心部分是由两块平面度和平行度极高的平面镜构成的谐振腔。这两个平面镜有很高的反射率，只有很少部分光透过镜片输出。具有半波长$\lambda/2$为腔长的整数分之一的光在腔内形成驻波，其输出得到加强。如果波长有很小变化，输出能量能急剧降低。在测量中F-P标准具的一块平面镜与被测物相联结，可调谐激光器出现峰值信号时，谐振频率是被测物位移的函数。对于腔长为1cm的F-P标准具，1nm的位移所对应的谐振频率改变量为47MHz，故理论上F-P标准具的测量分辨率可以高达10^{-7}nm。但实际上由于各种因素的影响，只能实现10^{-3}nm的测量分辨率。

三、X射线干涉测量技术

X射线干涉显微测量技术是近年新发展的纳米测量技术，是一种测量范围大，较易实现的纳米级测量方法。经早期实验证明X射线波长（λ）的数量级别为1Å，晶体中原子间距离也

是这个数量级。Laue 在 1912 年建议用晶体作为 X 射线的衍射光栅，但 X 射线干涉显微测量技术则是近年才发展的。均一的单晶硅尺寸稳定，其晶格常数可以用作长度基准。将三块单晶硅片平行放置，X 射线入射第一块硅片后产生衍射，其光束分为两路，经第二块硅片再次衍射，在与被测物联结一体的第三块硅片上光束汇合，产生干涉形成干涉条纹。被测物位移一个 Si（220）晶格间距 0.2nm，干涉信号变化一个周期，由干涉条纹数和相位，可以实现 0.005nm 分辨率的位移测量。

四、扫描隧道显微测量技术

1. STM 简介

扫描隧道显微镜（简称 STM）是 1981 年由两位在 IBM 瑞士苏黎士实验室工作的 C. Binnig 和 H. Rohrer 所发明。它可用于观察测量物体表面 Å 级的表面形貌，也就是它能观察测量物质表面单个原子和分子的排列状态以及电子在表面的行为，为表面物理，表面化学、生命科学和新材料研究提供一种全新的研究方法。后来随着研究的深入，STM 还可用于在纳米尺度下的单个原子搬迁、去除、添加和重组，构造出新结构的物质。这一成就被公认为 80 年代世界十大科技成果之一，它的发明者因此荣获 1986 年诺贝尔物理学奖。

STM 的基本原理是基于量子力学的隧道效应。在正常情况下互不接触的两个电极之间是绝缘的。然而当把这两个电极之间的距离缩矩到约 1nm 时，由于量子力学中粒子的波动性，电流会在外加电场作用下，穿过绝缘势垒，从一个电极流向另一个电极，正如不必再爬过高山，却可以通过隧道而从山下通过一样。当其中一个电极是非常尖锐的探针时，由于尖端放电而使隧道电流加大。用探针在试件表面扫描，将它“感觉”到的原子高低和电子状态的信息采集起来，通过计算机集成，即可得到表面的纳米级三维的表面形貌。

2. STM 的工作原理、方法及系统组成

当探针的针尖接近试件表面距离为 1nm 左右时，将形成如图 10-1 所示的隧道结。在探针和试件间加偏压 U_b，隧道间隙为 d，势垒高度为 φ，且 $U_b<\varphi$ 时，隧道电流密度 j 为

$$j=\frac{e^2}{h}\cdot\frac{k_a}{4\pi^2 d}\cdot U_b e^{-2k_0\varphi}$$

其中

$$\varphi=(\varphi_1+\varphi_2)/2$$

式中 h——普郎克常数；

e——电子电量；

k_a、k_0 为系数。

图 10-1 STM 的隧道结示意图

由上式可见，针尖与试件间的距离 d 对隧道电流密度 j 非常敏感。对于大多数金属试件，如果距离每减小 0.1nm，隧道电流密度 j 将增加一个数量级。这种隧道电流对隧道间隙的极端敏感性就是 STM 的基础。

STM 可以有两种测量模式，等高测量模式和恒电流测量模式。

（1）等高测量模式　这种测量模式的原理见图 10-2a，采用这种等高测量模式时，探针以不变高度在试件表面扫描，隧道电流将随试件表面起伏而变化，因此测量隧道电流变化就能得到试件表面形貌信息。这种测量方法只能用于测量表面起伏很小（<1nm）时的试件，且隧道电流大小与试件表面高低的关系是非线性的，由于上述限制这种测量模式很少使用。

（2）恒电流测量模式　这种测量模式的原理见图 10-2b。采用这种测量模式时，探针在试

件表面扫描时，要保持隧道电流恒定不变，即使用反馈电路驱动探针，使探针与试件表面的距离（即隧道间隙）在扫描过程中保持不变，这时探针将随试件表面的高低起伏而跟踪其高低起伏。记录反馈的驱动信号即得到试件表面的形貌信息。这种测量模式将隧道电流对隧道间隙的敏感性转移到反馈扫描器的驱动电压与其位移间的关系上，避免了等高测量模式时的非线性，提高了纵向测量的测量范围和测量灵敏度。现在 STM 大都采用这种测量模式，纵向测量分辨率最高可以到 0.01nm。

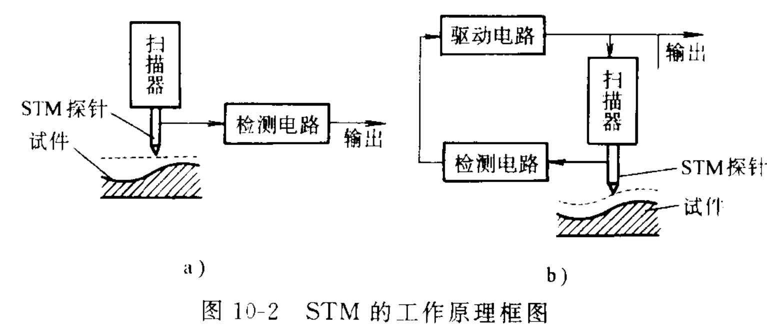


图 10-2　STM 的工作原理框图
a）等高测量模式　b）恒电流测量模式

获得表面微观形貌的信息后，通过计算机进行信息的数据处理，最后得到试件表面微观形貌的三维图形和相应的尺寸。

一般情形 STM 的隧道电流是通过探针尖端的一个原子，因而 STM 的横向分辨率最高可以达到原子级尺寸。

从上述 STM 的工作原理可知，它是由下面几部分组成：

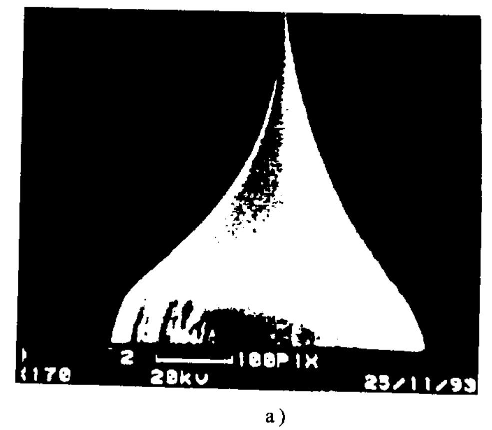
1）探针和控制隧道电流恒定的自动反馈控制系统；

2）纳米级三维位移定位系统，以控制探针的自动升降和形成扫描运动；

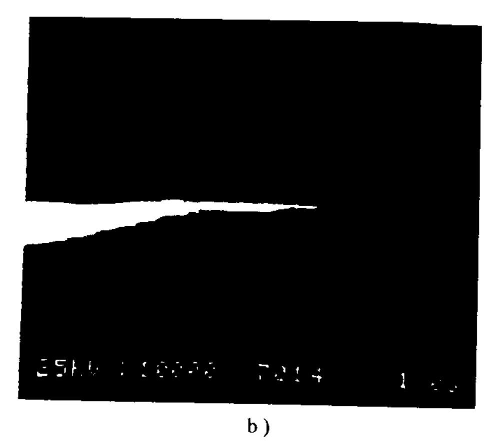
3）信号采集和数据处理系统，这部分主要是计算机软件工作。

3. STM 的探针和隧道电流控制系统

（1）STM 的探针　探针都用金属制成，要求尖端极为尖锐，这是因为顶端尖时可以形成尖端放电以加强隧道电流，此外还希望隧道电流是通过探针顶端的一个原子流出，这样使 STM 有极高的横向分辨率。探针的制造有用金属丝经电化学腐蚀，在金属丝腐蚀断裂的一瞬间切断电流，而获得极为锋锐的尖峰；另一种制造方法是金属丝（带）经机械剪切，在剪断处自然形成的尖峰，但应注意在显微镜下检查针尖，以避免尖端不尖或出现双峰。图 10-3 是针尖的 SEM 照片，从 SEM 照片的放大倍数估计，能获得的针尖曲率半径大致在 10nm 左右。



a)



b)

图 10-3　探针针尖的 SEM 照片
a）低放大倍数时　b）高放大倍数时

(2) STM 的隧道电流控制系统　在探针和试件间加偏压 U_b 以形成隧道电流。所加偏压必须小于势垒高度 φ，一般情况所加偏压数十毫伏。

现在的 STM 都采用恒电流测量模式，其隧道电流反馈控制系统的原理框图如图 10-4 所示。它由前置放大器，对数放大器、差分放大器、积分、比例放大器和高压放大器以及隧道结所组成。探针进行横向扫描时，由于探针和试件材料已确定，所设置的偏压也已确定，隧道间隙发生的变化使隧道电流按负指数规律变化。隧道电流经前置放大器放大后，转换成隧道电压输出，经对数放大器线性化处理后送入差分比较器与设置的预定电压相比较；将变化部分送至积分比例放大器作稳定及放大处理后再送入直流高压放大器放大，以控制压电陶瓷管产生与原误差方向相反的位移补偿，使隧道间隙保持不变，隧道电流保持恒定。横扫描时的探针升降值，即是试件表面的微观形貌值。

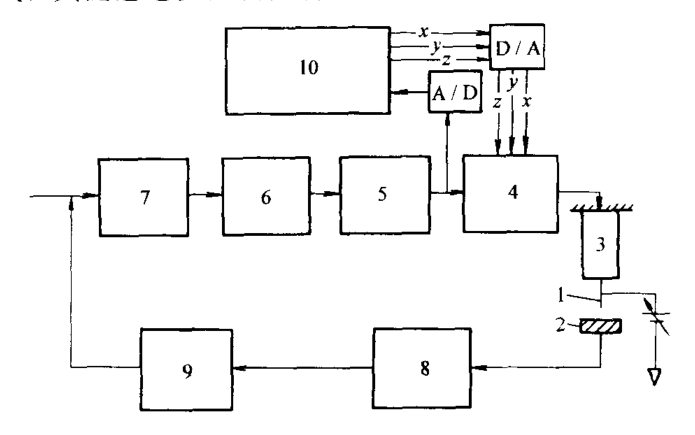


图 10-4　隧道电流反馈控制系统原理框图

1—探针　2—试件　3—压电扫描陶瓷管　4—高压放大　5—比例放大　6—积分放大　7—差分比较　8—前置放大　9—对数放大　10—微型计算机

4. STM 的三维位移定位系统

(1) 纳米级三维位移定位系统的方案　为测量试件表面的三维微观形貌，STM 需要一套精确的纳米级三维位移定位装置，其中 z 向控制探针的上下精确位移，x 和 y 向是为完成测量时的探针的扫描运动。测量时的 x 向和 y 向扫描运动，应复盖全部被测表面，如图 10-5 所示。为测量不同表面粗糙度的试件，x、y 和 z 向的位移速度，分辨率应能调节。

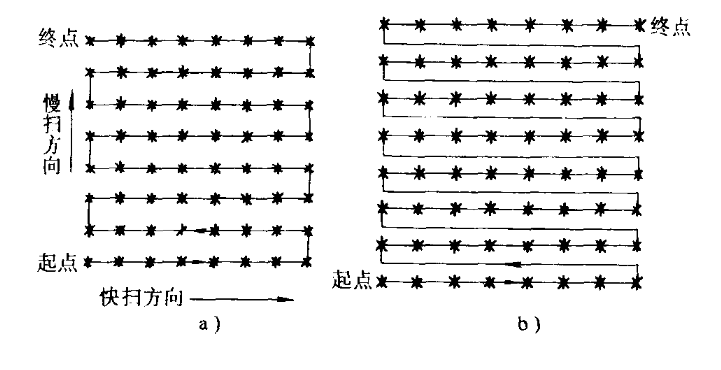


图 10-5　STM 的扫描运动

STM 的三维位移定位系统可以有不同的方案。早期的 STM 采用 x、y、z 三向由压电或电致伸缩传感器分别驱动的位移定位装置。其中一套压电传感器驱动系统控制探针作上下的 z 向位移，另两套压电传感器驱动系统组成 x-y 双向位移工作台以完成扫描运动。x-y 双向位移工作台可以装试件，使试件完成扫描运动；也可以将探针装在双向工作台上，使探针作扫描运动。这种双向位移工作台可以有很高的定位精度和较大的位移，但结构比较复杂。现在新的 STM 都采用压电陶瓷扫描管作三维位移定位器，使结构大大简化。压电陶瓷扫描管作 x、y、z 向位移定位时，有很高的分辨率，但 x 和 y 向的位移范围虽有数十微米，但有较大的非线性一，要求较高位移精度时，只能用较小的扫描范围。故现在有时使用压电陶瓷扫描管后再加上 x-y 双向位移工作台，以扩大扫描的尺寸范围。

(2) 压电陶瓷扫描管　G. Binnig 和 D. Smith 在 1985 年研制成功单管式压电陶瓷扫描器、

它结构简单，扫描频率高达数十 kHz 以上，可以实现 x、y、z 三个方向上的微位移。纵向位移范围 10μm 以下，分辨率优于 0.01nm；横向扫描范围数十 μm，但有较大的非线性。这是一种适合于小范围、高分辨率的三维扫描器，是现在 STM 中使用得最多的一种三维位移扫描器。

压电陶瓷扫描管结构见图 10-6。压电陶瓷管是用锆钛酸铅等材料高温烧结和极化而成。陶瓷管外壁有沿轴向的、对称分布的四个金属膜电极，其中相对的两个电极成对使用，施加单极性或双极性的电压，U_x 产生一个水平方向 x 的扫描运动。另外两个相对的电极，施加类似的电压，U_y 产生另一个水平方向 y 的扫描运动，从而实现了 x-y 方向的二维扫描运动。陶瓷管内壁也全部镀上金属膜形成电极，内壁电极接地或接 z 向位移的驱动电压 U_z。

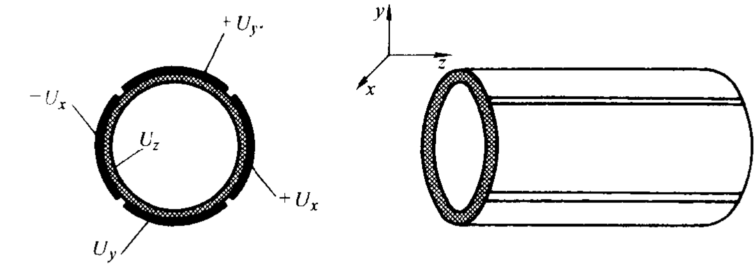


图 10-6　压电陶瓷扫描管的结构原理

现分析压电陶瓷扫描管实现位移扫描的原理。压电陶瓷管一般是顶端固定，下端带着探针。压电陶瓷管极化时要求在管内壁和外壁间有电位差时，管的长度将伸长或缩短。现在假设陶瓷管内壁接地，相对的两个外壁电极接 $+U_x$ 和 $-U_x$，则陶瓷管壁一侧将伸长，相对的另一侧缩短，陶瓷管将向一侧弯曲，如图 10-7 所示，这将带动探针实现水平方向的位移扫描。如果两个相对的外壁电极同时接上相等的正电压或负电压，则陶瓷管将伸长或缩短，实现 z 向的位移。

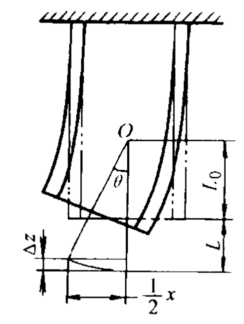


图 10-7　压电陶瓷扫描管实现水平位移扫描的原理

（3）x-y 双向微位移工作台　这种微位移工作台因位移扫描精度高，位移的范围大，故在 STM 中仍常使用。

x-y 双向微进给工作台要求分辨率高，位移范围大（50-100μm），刚性和稳定性好。现在 x-y 双向微进给工作台都采用压电或电致伸缩传感器驱动，柔性铰链的整体结构。由于常用的压电和电致伸缩传感器本身的最大伸长量为 8～25μm，不能满足宽范围微进给工作台的要求，故常采用一级或两级杠杆放大机构以达到宽范围的位移。

图 10-8 中是一种宽范围 x-y 双向微进给工作台，工作台体为整体结构，采用弹性柔性铰链结构实现工作台的位移。使用两个电致伸缩传感器分别作 x 和 y 向的驱动。为提高工作台的刚性和位移精度，采用了四支承式对称结构，并通过二级杠杆放大将输入位移放大。x-y 双向工作台互相垂直地设计在同一平面内，x 向工作台刚性地嵌套在 y 向工作台之内；即内层为 x 向工作台，外层为 y 向工作台。每层工作台均由四个柔性铰链支承，分别由两个电致伸缩传感器通过二级杠杆放大机构驱动，可以实现无爬行、无蠕动、无噪音、无转角的大范围的双向微位移，x 向和 y 向位移的相互干扰小于 1%。

工作台放大驱动的结构原理见图 11-18b。电致伸缩传感器经二级杠杆放大驱动工作台。第一级放大比为 $(R_1+R_2)/R_1$，第二级放大比为 $(R_3+R_4)/R_3$。第二级放大杠杆对称地作用在四支承移动工作台两侧，这一方面保证了微位移工作台的刚度，同时保证微位移工作台作直线微位移而无转角。

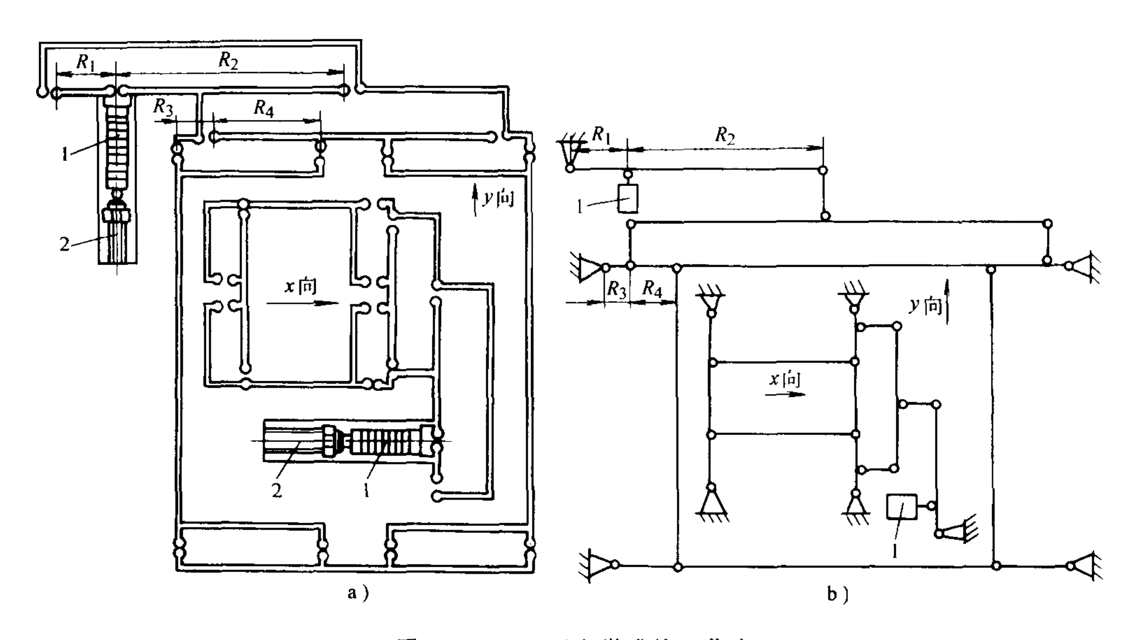


图 10-8 x-y 双向微进给工作台

a）工作台结构 b）工作台放大驱动原理

1—电致伸缩传感器 2—预载调整螺钉

5. STM 的使用

（1）探针的预调 STM 都有精密的探针预调机构，并有低倍数的显微镜监测针尖，到探针很接近试件表面时，启动 z 向微位移驱动系统直到探针尖有隧道电流。

（2）STM 的环境保证条件 STM 要求很好的隔振系统，以防止外界振动对测量工作的干扰。STM 工作时要求恒温和防止气流干扰。某些测量工作要求在真空条件下进行。

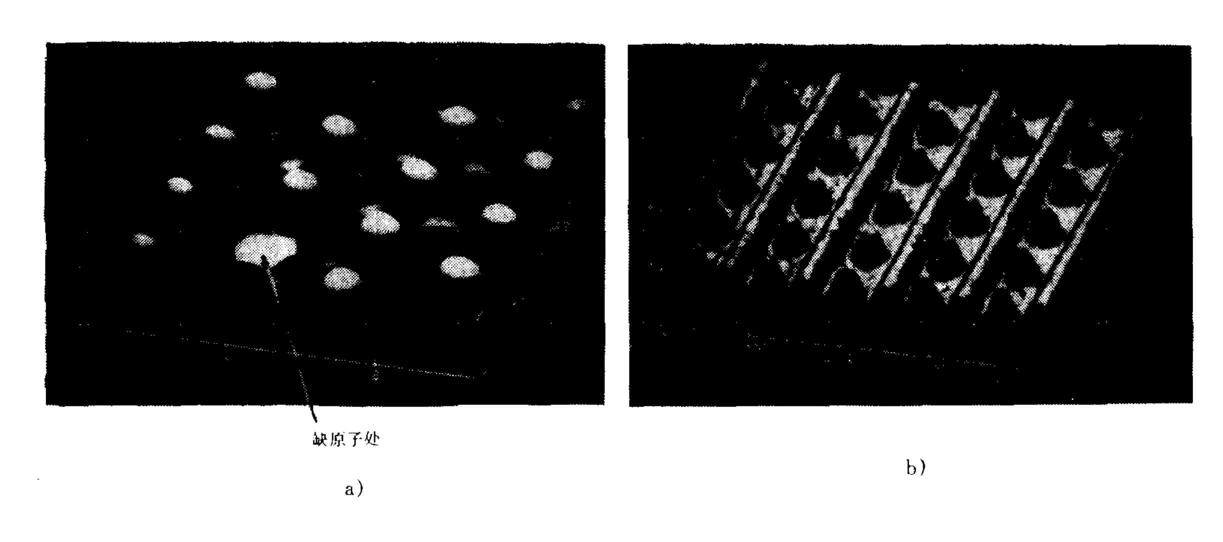


图 10-9 STM 测得的试件表面形貌图

（3）STM 测得的表面形貌图 检测时先得到表面的线扫描图，经消影和图象处理后得到被测表面的彩色立体形貌图。可以根据被测表面的不同而取不同的放大倍数。图 10-9 中是用 STM 测得的不同放大倍数的试件表面形貌图（原图为彩色）。图 10-9a 放大倍数大，是铂晶体

表面吸附碘原子的情况，可看到有一处缺了一个原子。图 10-9b 是放大倍数较低时测得的某种磁性材料的表面形貌图。

(4) STM 的扩大应用　STM 发明后被广泛应用在多种科学研究中，使用面日广。并且后来发现在探针和试件间加一定的偏压，可以将试件表面的原子吸附在探针针尖上移动，使 STM 不仅用于原子级表面的测量，而可以用于试件表面原子级的加工，使 STM 的应用扩大到一个全新的广宽的领域。

五、微观表面形貌的扫描探针测量和其他扫描测量技术

扫描隧道显微镜虽然有极高的测量灵敏度，但它是靠隧道电流进行测量的，因此不能用于非导体材料的测量。有人参考扫描隧道显微镜的测量原理，提出依靠探针尖和试件表面间的原子作用力来测量的原子力显微镜（AFM），依靠磁作用力的磁力显微（MFM），激光力显微镜（LFM），光子扫描隧道显微镜等一系列扫描探针测量技术或类似的扫描测量技术，可以分别用于测量非导体，磁性物质甚至有机生物体等表面的纳米级测量。现仅就原子力显微镜（AFM）进行阐述。

(1) AFM 的测量原理　为解决非导体的表面微观形貌的检测，G. Binnig1986 年发明了原子力显微镜，它是利用原子间的作用力而进行测量的。

当两原子间距离缩小到 Å 级时，原子间的相互作用力就显示出来。由于这两原子的相互作用，造成两个原子的势垒高度降低，使系统的总能量降低，于是二者之间产生吸力。如这两原子间的距离继续减小到原子直径时，由于原子间的电子云的不相容性，两原子间的作用力表现为排斥力。在 AFM 中，探针与样品之间的原子间的吸力和排斥力的典型值在 10^{-9}N，即 nN 左右。

AFM 可有两种测量模式，接触测量和非接触测量。接触式测量利用原子间的排斥力，探针针尖和试件表面间距离小于 0.5nm；非接触式测量利用原子间的吸引力，探针针尖和试件表面间距离在 0.5～1nm。由于利用原子间排斥力的接触式测量，分辨率要高很多，可以到原子级分辨率，现在 AFM 主要采用这种测量模式。

AFM 的测量原理是探针扫描试件表面，保持探针与被测表面间的原子排斥力一定，探针扫描时的纵向位移即是被测表面的微观形貌。

(2) AFM 的结构和工作原理　可以有不同方法保持探针在试件表面的原子间的排斥力恒定。常用的方法是将探针用悬臂方式装在一个微力传感弹簧片上，这弹簧片要非常软，弹性系数在 0.01～0.1N/m。探针在试件表面扫描时，探针将随被测表面起伏而升降。G. Binnig 研制的 AFM 是用扫描隧道显微镜来检测探针的纵向位移的，其结构原理如图 10-10 所示。从图中可看到试件装在能作三维扫描的 AFM 扫描驱动台上，AFM 探针装在软弹簧片的外端。STM 的驱动只能作纵向（一维）微进给，STM 的探针检测出 AFM 探针的簧片的纵向起伏运动。进行测量时，AFM 的探针被微力弹簧片压向试件表面，探针尖端和试件表面间的原子排斥力将探针微微抬起，达到力的平衡。AFM 探针在试件表面扫描时，因微力弹簧的压力基本不变，故探针将随被测表面的起伏面上下波动、AFM 探针弹簧片后面的 STM 探针和弹簧片间产生隧道电流，控制隧道电流不变，则 STM 的探针和 AFM 的探针将作同步的纵向位移运

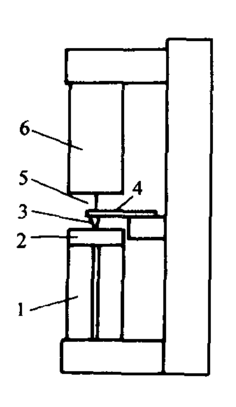


图 10-10　AFM 的结构原理
1—AFM 扫描驱动　2—试件　3　AFM 探针　4—微力弹簧片　5—STM 探针　6—STM 驱动

动，即可测出试件表面的微观形貌。

现在有多种方法测量 AFM 探针和弹簧片的位移值，如位敏光电元件，激光法，电容法等，但使用 STM 时因灵敏度高仍是较好的测量方法。

微力弹簧将探针压向试件表面的力甚小，在 10^{-9}N 左右，因弹簧力不超过原子间排斥力，故不会划伤试件表面。AFM 的测量分辨率纵向可以达到 0.01～0.1nm。

第三节　纳米级表层物理力学性能的检测

各种材料极薄表层的物理、化学、力学性能和材料内部的性能常有很大差异，而正是这极薄的表层材料在摩擦磨损、物理、化学、机械行为中起着主导作用。对均质材料而言，由于表层的钝化，加工硬化，吸附，化学污染，疲劳等使表层材料的性能和材料内部性能有较大差异。为改善材料性能而进行的材料表面改性，涂层等则使表层材料的性能和内部性能相差更大，而对材料性能起主导作用的表层材料性能却因检测不易而较少研究。现在“信息时代”的新型“智能型”材料的出现，如计算机磁盘，光盘等要求表层不但有优良的电、磁、光性能，而且要求有良好的润滑性、摩擦小、耐磨损、抗化学腐蚀、组织稳定和优良的力学性能。因此世界各国都非常重视材料的纳米级表层的物理、化学、力学性能及其检测方法的研究。这里仅介绍表层材料的力学性能等主要物理力学性能的检测。

一、表层显微力学性能的检测方法的比较

材料表层显微力学探针检测法是用纳米压痕的原理检测其力学性能的。

薄膜涂层的力学性能可以有不同的检测方法，如纳米压痕法，X 光衍射应力测试法，基体材料弯曲的应力测量法，薄膜拉伸测量应力应变，薄膜凸曲变形测应力应变，薄膜弯曲测弹性和屈服特性等。上述这些方法中只有纳米压痕法和 X 光衍射法可测量和基体相连的材料表层的力学性能，其中 X 光衍射法只能测量材料表层一定深度内的综合内应力。只有纳米压痕法不仅可以测表层材料的硬度、弹性模量、屈服蠕变、应变速率等多项力学性能，并且改变压痕深度（即改变加载大小）可以测出表层材料不同深度时的力学性能。故纳米压痕法，即显微力学探针检测法，是现在检测材料表层力学性能的主要方法。

二、表层显微力学探针检测法的基本原理

表层显微力学探针检测的原理，是用金刚石针尖用极小的力在试件表面压出纳米级或微米级压痕，根据压痕的大小测出试件表层的显微力学性能。

传统的材料硬度和显微硬度，是根据金刚石压头或钢球受力在试件上压出的压痕面积大小而测得的。由于检测过程中加载和测量压痕面积是分开的，故只能测出材料硬度而得不到材料的其他力学性能。

表层显微力学探针检测法，则是连续记录探针针尖加载逐步压入和卸载逐步退出试件表层的全过程的压痕深度变化，因其中包含试件表层的弹性变形、塑性变形、蠕变、变形速率等多种信息，所以可以通过这信息测出表层材料的多项力学性能。

图 10-11 是显微力学探针在加载和卸载时压痕深度的检测曲线。从这曲线可看到探针针尖和试件开始接触后，载荷力甚小，试件在 ab 段为弹性变形。随加载力增加探针尖压入试件表面而产生塑性变形，曲线 bc 段内有弹性和塑性变形。开始卸载时，压痕有弹性恢复，cd 段为完全弹性恢复区。假如压痕全部是弹性变形，在弹性变形区载荷和压痕深度应是线性关系，

故可将 cd 段延长，ce 段的斜率 $S_{max}=\frac{dF}{dh}$。因压痕同时有弹性和塑性变形，故最后卸载曲线为 cdf，残余压深为 h_r。根据这“载荷-压痕”深度曲线可以得到试件表层的力学性能。

1. 材料表层的硬度

材料显微硬度 H 按定义应是最大载荷力 F 和压痕面积 A 之比

$$H=\frac{F}{A}$$

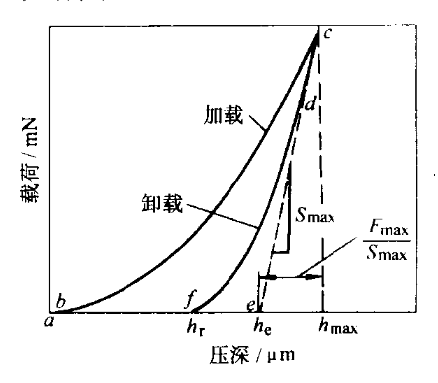


图 10-11 显微力学探针在加载和卸载过程中压痕深度变化曲线

由于纳米压痕的面积测量困难，故平时根据压痕的深度 h 推算出压痕的面积。但由于卸载时压痕中心和压痕近边处的弹性恢复量不同，故不能使用残留压痕深度 h_r 来计算压痕的面积。此外探针顶端有一定圆角，计算压痕面积时不能忽视。A. J. Griffin 等人推荐用有效压深 h_e 及其相应经验公式来计算压痕面积

$$h_e=h_{max}-\varepsilon\frac{F_{max}}{S_{max}}$$

探针顶端为平面时 $\varepsilon=1$，顶端为曲面时 $\varepsilon=0.75$。压痕面积 A 可用下面经验公式计算

$$A=kh_e^2$$

k 值和探针针尖的形状（四棱锥或圆锥）有关，为一常数。在压痕面积 A 求得后即可根据加的载荷 F 算出表层的显微硬度。

2. 表层材料的弹性模量

在上述载荷—压深曲线中，有弹性变形区，从这弹性变形区的信息，可以得出表层材料的弹性模量。

3. 表层材料的蠕变

在探针针尖压入试件表面后，维持较长时间载荷不变，根据压痕深度的变化信号，可以得出表层材料的蠕变信息。

4. 表层材料内不同深度时的材料力学性能

可以加不同载荷，得到不同深度的压痕从而得到不同深度时的材料力学性能。此外由于加载时压痕深度是由浅变深，这实际上已包含了不同深度材料力学性能的信息。

三、表层材料显微力学探针检测装置的结构原理

显微力学探针检测装置和 AFM 极为相似，只是多了一套探针加力系统。加力系统可有两种方式，一是在检测系统中增加一套加载力可调的微力加载系统；另一种是根据探针的弹簧片的位移变形算出加载力，靠增大弹簧片的位移实现探针的加载，但这时压痕的深度应是试件位移和弹簧片位移的差值。图 10-12 是显微力学探针检测系统的结构示意图。

检测时先调整 x-y 微位移工作台 5，使金刚石探针 1 对准试件表面要检测的位置，试件高度应调整合适，调整 z 向粗调和半精调机构 6 使探针 1 将接近试件表面（使用低放大倍数的光学显微镜监测）。开动 z 向的压电微位移工作台 4，使试件接触金刚石探针并逐步压入试件表面。用激光位移检测系统测出探针弹簧片的位移，试件 z 向微位移由压电传感器的驱动系统系

9 给出，经信号采集处理系统的数据处理，最后得到压痕深度的输出。金刚石逐步压入试件时的加载力可从微力弹簧片的位移变形算出。在检测不同材料要求不同的压痕深度时，可以更换微力弹簧片，以获得不同的加载力范围。

四、显微力学探针检测系统的应用

1. 材料表层的显微硬度

用显微力学探针法测出的材料表层硬度一般都大于用常规硬度测量法测出的硬度，分析后认为有两个原因：第一是加载力不同时，由于卸载的弹性恢复不同，测得的硬度值应是有不同。例如用常规的显微硬度计测同一材料的硬度，加载 30N 和加载 15N 所测得的硬度值就有较大差别；第二，材料表层的硬度本来就高于基体的硬度，并且是越近表面硬度越高，这在检测材料不同深度的硬度时可以得到证实。

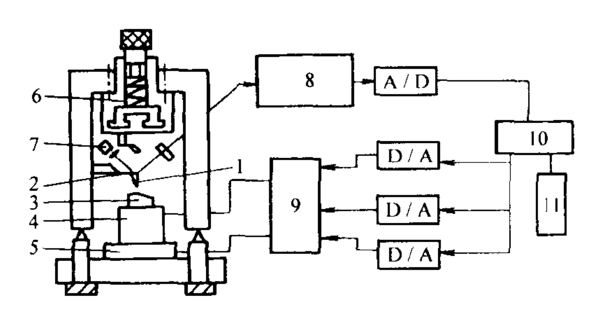


图 10-12 显微力学探针检测系统结构原理图
1—金刚石探针 2—微力弹簧片 3 试件 4 z 向压电微位移工作台 5—x-y 微位移工作台 6 z 向粗调及半精调机构 7—激光位移检测系统 8 位移信号检测放大 9—压电传感器驱动系统 10—计算机 11—压痕深度显示

使用均质材料来检测显微力学探针检测系统检测硬度的效果。图 10-13 是测量单晶铜（110）晶面时得到的“载荷—压深”曲线。使用 90°四棱锥金刚石压头，这时压痕面积为

$$A=5.66h_c^2$$

根据得到的“载荷—压深”曲线可以求出显微硬度 $H=0.75$GPa，用常规方法测得的硬度为 0.72GPa。因单晶铜表层和内部硬度应该相差不大，证明用显微力学探针法检测硬度的结果是可靠的。

图 11-14 为铝合金 6061Al 用显微力学探针法测得的“载荷—压深”曲线，可以算出其微硬度为 1.14GPa。

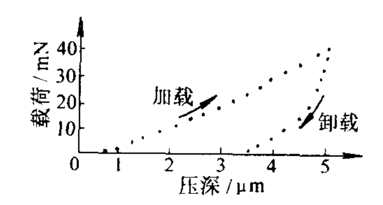


图 10-13 单晶铜（110）晶面的载荷压深曲线

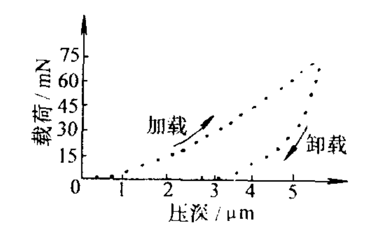
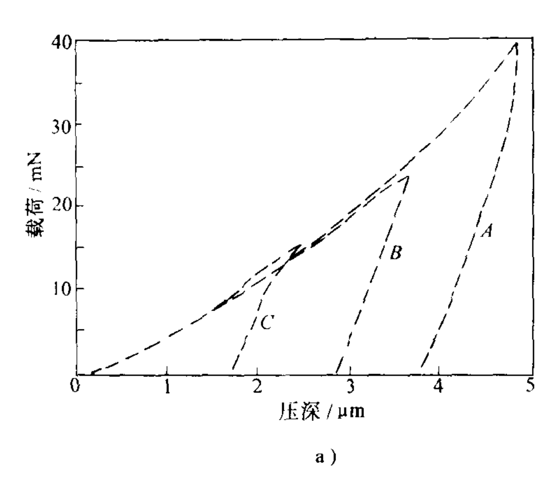


图 10-14 铝合金 6061Al 的载荷压深曲线

2. 均质材料表层不同深度的显微硬度

过去测表层不同深度的显微硬度需多次测量，即用不同载荷压入不同深度，以求出不同深度时的硬度。使用显微力学探针检测时，因能记录下加载和卸载时不同载荷时的压痕深度，故一次检测即可得到不同深度时的硬度，而不必进行多次检测。

检测铝合金 6061Al 的表层不同深度时的显微硬度。图 10-15a 所示是用三种不同最大载荷时的“载荷—压深”曲线。根据这载荷压深曲线计算出离表面不同深度时的显微硬度，结果如图 10-15b 所示。从得到的结果可知，用三种不同的载荷时得的“载荷—压深”曲线的加载曲线部分非常接近，卸载时的曲线的斜率也非常接近，因而最后得到的表层显微硬度也极为接近。这证明要得到离表面不同深度的显微硬度，用显微力学探针法检测时只要进行一次检测，即可根据所得的“载荷—压深”曲线得出离表面不同深度的显微硬度。



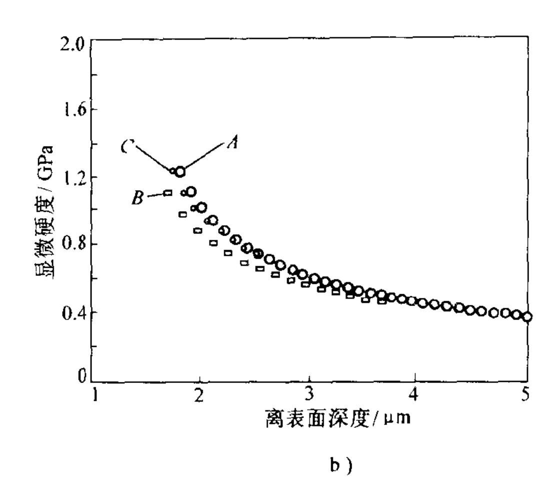


图 10-15 用显微力学探针法测得的 6061Al 的表层硬度

a）不同最大载荷时的加载压深曲线 b）离表面不同深度时的显微硬度

从实测结果可以看到很多的材料表层的显微硬度大于基体的显微硬度。

3. 均质材料蠕变特性的研究

蠕变特性反映了材料塑性变形的动态行为，其机理极为复杂，因此可通过实验对它进行研究。这里介绍用显微力学探针研究表层材料的蠕变特性。测试材料为铝，用较高的加载速度将金刚石探针压入试件到设定的最大载荷，然后控制压电传感器，使其位置固定，探针运动停止。随着保持时间的延长，在应力释放蠕变进行中，记录下载荷和压深随时间的变化，如图 10-16 所示。可以看到随着时间增加，蠕变增加，使压深增大，同时载荷自动逐步减小。进行蠕变测试要求的实验条件是很严格的，因为温度变化、试验装置的稳定性等都影响测量结果。

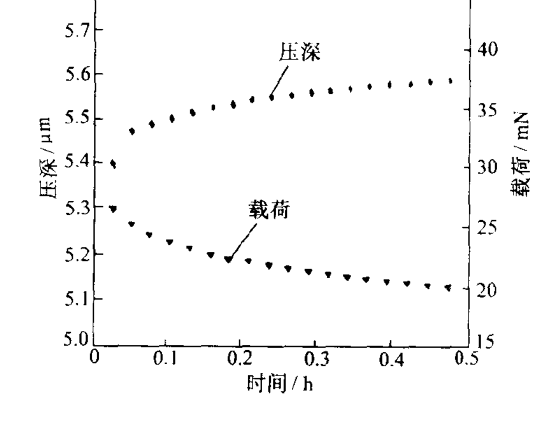


图 10-16 载荷和压深随时间的变化规律

根据检测材料的蠕变特性，还可检测和蠕变有关的应变速率。

4. 材料的弹性模量的检测

均质材料单向拉伸和压缩条件下的弹性模量 E，可根据其应力 σ 和应变 ε 的关系计算

$$E=\frac{\sigma}{\varepsilon}$$

用显微力探针检测时，探针压入形成压痕的过程中，变形行为是极为复杂的。把压头简化成末端具有平直几何形状的圆柱冲头，可推出卸载斜率 S 与接触面积 A 及弹性模量 E 的关系

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}h}=S=\beta E^{*}\sqrt{A}$$

式中 E^{*}——考虑压痕系统的有效弹性模量；

β——与探针端部形状有关的修正系数。

E^{*} 值和金刚石探针的弹性模量 E_{i} 和试件材料的弹性模量 E 有关，可用下式计算

$$\frac{1}{E^*}=\frac{1-\nu_i^2}{E_i}+\frac{1-\nu^2}{E}$$

式中　ν_i——金刚石探针的泊松比；

　　　ν——试件材料的泊松比。

R.B.King曾给出压头（探针端部）不同几何投影形状时的β值：圆形时$\beta=\frac{2}{\pi}$，方形时$\beta=1.011\frac{2}{\sqrt{\pi}}$。

当材料表层经表面改性或有薄膜涂层时，表层中不同深度的弹性模量不等，且过渡层和基体的性能都影响检测的结果。当薄膜涂层的膜厚在纳米数量级时，弹性模量异常增大，过渡界面将影响应力、应变的分布与传递。在用显微力学探针检测时，当探针压入深度较小时，测得的数据接近于薄膜的真实性能，探针压入深度逐步加大时，基体影响加大，最后基体性能起主导作用。

5. 金属基复合材料界面附近的力学性能

现在晶须增强和颗粒增强的金属基复合材料应用日广。界面结构和性能对金属基复合材料的性能起着决定性的作用。但由于目前对界面的测试手段有限，界面附近的力学行为研究较少。使用显微力学探针检测技术可以对这些复合材料的界面处的显微力学性能进行检测，来获得界面附近的力学行为。

第四节　纳米级加工技术

一、纳米级加工的物理实质分析

纳米级加工的物理实质和传统的切削磨削加工有很大不同，一些传统的切削磨削方法和规律已不能用在纳米级加工。

欲得到1nm的加工精度，加工的最小单位必然在亚微米级。由于原子间的距离为0.1～0.3nm，纳米级加工实际上已到加工精度的极限。纳米级加工中试件表面的一个个原子或分子将成为直接的加工对象，因此纳米级加工的物理实质就是要切断原子间的结合，实现原子或分子的去除。各种物质是以共价键、金属键、离子键或分子结构的形式结合而组成，要切断原子或分子的结合，就要研究材料原子间结合的能量密度，切断原子间结合所需的能量，必然要求超过该物质的原子间结合能，因此需要的能量密度是很大的。表10-2中是若干种材料的原子间结合能密度。在机械加工中工具材料的原子间结合能必须大于被加工材料的原子间结合能。

表10-2　不同材料的原子间结合能密度

材　料	结合能/（J·cm^{-3}）	备　注	材　料	结合能/（J·cm^{-3}）	备　注
Fe	2.6×10^3	拉　伸	SiC	7.5×10^5	拉　伸
SiO_2	5×10^2	剪　切	B_4C	2.09×10^6	拉　伸
Al	3.34×10^2	剪　切	CBN	2.26×10^8	拉　伸
Al_2O_3	6.2×10^5	拉　伸	金刚石	5.64×10^8～1.02×10^7	晶体的各向异性

在纳米级加工中需要切断原子间结合故需要很大的能量密度，约为 $10^5 \sim 10^6 J/cm^3$，或 $10^{-21} \sim 10^{-16} J/cm^3$ 原子。传统的切削、磨削加工消耗的能量密度较小，实际上是利用原子、分子或晶体间连接处的缺陷而进行加工的。用传统切削磨削加工方法进行纳米级加工，要切断原子间的结合就相当困难了。因此直接利用光子、电子、离子等基本能子的加工，必然是纳米级加工的主要方向和主要方法。但纳米级加工要求达到极高的精度，使用基本能子进行加工时，如何进行有效的控制以达到原子级的去除，是实现原子级加工的关键。近年来纳米级加工有很大的突破，例如用电子束光刻加工超大规模集成电路时，已实现 0.1μm 线宽的加工；离子刻蚀已实现微米级和纳米级表层材料的去除；扫描隧道显微技术已实现单个原子的去除、搬迁、增添和原子的重组。纳米加工技术现在已成为现实的、有广宽发展前景的全新加工领域。

二、纳米级加工精度

纳米级加工精度包含：纳米级尺寸精度，纳米级几何形状精度，纳米级表面质量。对不同的加工对象这三方面有所偏重。

1. 纳米级的尺寸精度

1）较大尺寸的绝对精度很难达到纳米级。零件材料的稳定性，内应力，本身重量造成的变形等内部因素和环境的温度变化、气压变化、测量误差等都将产生尺寸误差。因此现在的长度基准不采用标准尺为基准，而采用光速和时间作为长度基准。1m 长的实用基准尺，其精度要达到绝对长度误差 0.1μm 已经是非常不易了。

2）较大尺寸的相对精度或重复精度标达到纳米级，这在某些超精密加工中会遇到，如某些特高精度孔和轴的配合，某些精密机械精密零件的个别关键尺寸，超大规模集成电路制造过程中要求的重复定位精度等，现在使用激光干涉测量和 X 射线干涉测量法都可以达到 Å 级的测量分辨率和重复精度，可以保证这部分加工精度的要求。

3）微小尺寸加工达到纳米级精度，这是精密机械、微型机械和超微型机械中遇到的问题，无论是加工或测量都需要继续研究发展。

2. 纳米级的几何形状精度

这在精密加工中经常遇到，例如精密轴和孔的圆度和圆柱度；精密球（如陀螺球、计量用标准球）的球度；制造集成电路用的单晶硅基片的平面度；光学、激光、X 射线的透镜和反射镜、要求非常高的平面度或是要求非常严格的曲面形状。因为这些精密零件的几何形状直接影响它的工作性能和工作效果。

3. 纳米级的表面质量

表面质量不仅仅指它的表面粗糙度，而且包含其内在的表层的物理状态，如制造大规模集成电路的单晶硅基片，不仅要求很高的平面度，很小的表面粗糙度和无划伤，而且要求无表面变质层（或极小的变质层）、无表面残留应力、无组织缺陷。高精度反射镜的表面粗糙度、变质层会影响其反射效率。微型机械和超微型机械的零件对其表面质量亦有极严格的要求。

三、纳米加工中的 LIGA（Lithographie，Galvanoformung，Abformung）技术

这是最新发展的光刻、电铸和模铸的复合微细加工新技术，被认为是一种三维立体微细加工的最有前景的新加工技术，将对微型机械的发展起到很大的促进作用。

用 LIGA 技术可以制作各种各样的微器件和微装置，材料可以是金属（含合金）、陶瓷、聚合物和玻璃等，可以制作微形件的最大高度为 1000μm，横向尺寸 0.5μm 以上，高宽比大于 200 的立体微结构，加工精度可达 0.1μm。刻出的图形侧壁陡峭，表面光滑。加工出的微器件

和微装置可以大批量复制生产、成本低。

用LIGA技术已研制成功或正在研制的产品有微传感器、微电机、微执行器、微机械零件、集成光学和微光学元件、真空电子元件、微型医疗器机械和装置，流体技术微元件，纳米技术元件及系统等。LIGA产品涉及的尖端科技领域和产业部门极广，其技术经济的重要性和市场前景，社会、经济效益是显而易见的。

LIGA技术是80年代中期由德国W. Ehrfeld教授等人发明的。它是由深度同步幅射X射线光刻，电铸成型，塑铸成型等技术组合而成的综合性技术。

现在在LIGA工艺中有加入牺牲层的方法，使获得的微型器件中有部分可以脱离母体而能移动或转动，这在制造微型电机或其他驱动器时很重要。还有人研究控制光刻时的照射深度，即使用部分透光的掩膜，使曝光时同一块光刻胶在不同处曝光深度不同，从而获得的光刻模型可以有不同的高度，用这方法可以得到真正的三维立体微型器件。

为了制造复杂形状或复合的硅微型机械和器件，常需要将几块基板键合在一起。常遇到的是Si基板和Si基板，Si基板和玻璃基板的键合。基板的键合技术是微型机械制造中的不可缺少的加工技术。基板键合时必须保证键合尺寸十分精确，同时键合部分不变形。这就要求基板键合时不变形，键合的两块基板热膨胀系数相同。

Si基板和Si基板键合时可采用直接键合，基板的面要加工得非常平，两基板加热到1000℃以上的高温，压在一起。它是靠原子力将两块Si基板键合在一起的，键合非常牢固。由于是相同材料，热膨胀系数相等，没有热应力，不会产生键合变形。两基板键合成一体可以进行普通半导体加工。利用两块基板晶向不同，各向异性腐蚀对两基板进行微加工，可以制出复杂的图形。

Si基板和硼硅酸玻璃的键合采用阳极键合。这种玻璃的热膨胀系数和Si基板非常接近，故键合过程中变形和应变都非常小。在加热到400℃左右时，玻璃侧施加数百伏负电压，玻璃和硅片间就会产生很大的静电引力，表面就相互紧密接触，牢固地键合在一起。

器件的键合技术本身不是超精密加工技术，也不属于LIGA技术范围内，但在制造微型器件时是一项必不可少的辅助工艺技术。

四、扫描隧道显微加工技术

1. 原子级加工的基本原理

扫描隧道显微镜发明初期是用于测量试件表面纳米级的形貌，不久又发明了原子力显微镜。在这些显微探针检测技术的实用中发现可以通过显微探针操纵试件表面的单个原子，实现单个原子和分子的搬迁、去除、增添和原子排列重组，实现极限的精加工，原子级的精密加工。

当显微镜的探针对准试件表面某个原子并非常接近时，试件上的该原子受到两方面的力，一面是探针尖端原子对该原子间作用力，另一面是试件其他原子对该原子间结合力。如探针尖端原子和该原子的距离小到某极小距离时，探针针尖可以带动该原子跟随针尖移动而又不脱离试件表面，实现了试件表面的原子搬迁。

在显微镜探针针尖对准试件表面某原子时，再加上电偏压或加脉冲电压，使该原子成为离子而被电场蒸发，达到去除原子形成空位。实验证明，无论正脉冲或负脉冲均可抽出单个的Si原子，说明Si原子既可以正离子也可以负离子的形式被电场蒸发。在有脉冲电压情况下，也可从针尖上发射原子，达到增添原子填补空位。

2. 原子级加工技术及其发展

1）近年来扫描隧道显微加工技术，即原子级加工技术获得了迅速的发展，取得了多项重要成果。1990年美国圣荷塞IBM阿尔马登研究所的D.M.Eigler等人在4K和超真空环境中用STM将Ni（110）表面吸附的Xe（氙）原子逐一搬迁，最终以35个Xe原子排成IBM三个字母，每个字母高5nm，Xe原子间最短距离约为1nm。这原子搬迁的方法就是使显微镜探针针尖对准选中的Xe原子，使针尖接近Xe原子，使原子间作用力达到让Xe原子跟随针尖移动到指定位置而不脱离Ni的表面。用这方法可以排列密集的Xe原子链。

2）1991年日本S.Hosoki等人用STM在MoS_2表面用硫空位写成"PEACE' 91CRL"的字样，每个字母尺寸仅为2nm。这用硫空位写字的方法是将STM针尖对准某个硫原子，在针尖和试件间加脉冲电压，使硫原子电离，由于电场蒸发原理而逸离试件表面，留下空位。1993年日本研究开发公司的M.Aono发表在室温条件下用STM加脉冲电压可以从Si（111）7×7表面抽出原子，机理为场蒸发。无论正负脉冲均能抽出单个Si原子，表明Si原子可以成为正离子，也可以成为负离子而被电场蒸发。

3）美国的D.M.Eigler等人在实现Xe原子搬迁后，又实现了分子的搬迁排列。在铂单晶的表面上，将吸附的一氧化碳分子（CO）用STM搬迁排列起来，构成一个身高仅5nm的世界上最小的人的图样。用来构成这图样的CO分子间距离仅为0.5nm，人们称它为"一氧化碳小人"。

4）1993年11月号的美国的Physics Today杂志封面上刊登了一个圆形的象美丽的皇冠样的图形，它由周边的48个小图形组成，从中心到周围荡着水波一样的装饰。这是IBM公司科学家们的纳米技术的又一杰作。它是在单晶的表面用48个铁原子围成一个14.3nm的圆圈，相邻两个铁原子间距离仅为1nm。这是用STM在4°K和高真空条件下移动铁原子到单晶铜表面三个等距排列的铜原子的中心位置。这创作是一种人工的围栏，把电子圈在围栏中心，关在围栏中的电子的表面电子态密度受到围栏中铁原子的影响，形成美丽的"电子波浪"，使人们能直观的看到电子态密度的分布。这实验还显示了电子是如何与人造的原子尺寸结构相互作用的。根据这原理，可以为电子建立一个由铁原子构成的量子围栏，进行观察这样的电子如何给出量子力学基本方程的解，对这些电子态密度波浪的精确测量表明，它们恰好代表电子在这种围栏中应处的能量位置。

5）将STM用于纳米级光刻加工时，它具有极细的光斑直径，可以达原子级，这样可使加工特征和加工工具处于同一尺度。其次是所产生的二次电子对线宽影响很小，并且成本较低，可以在大气甚至在液体介质中工作。美国IBM公司的M.A.McCord等在Si片上均匀覆盖一层厚20nm聚甲基丙烯甲脂（PMMA）然后用STM进行光刻，得到10nm宽线条的图案，其后M.A.McCord等又相继研制成功13.5nm厚的Au-Pd合金薄膜电阻。

6）1994年美国威斯康星大学的C.T.Salling等人报道，在室温条件下对Si（100）2×1台阶表面用STM作原子级修饰，并可制造几何形状规则的原子级超微结构，用同样方法也可制造具有原子级水平的岭脊。同年伊利诺大学的J.W.Lyding等人在超高真空对氢吸附的Si（100）2×1表面用STM作表面修饰，得到了宽度1nm的线条。针尖置负偏压，针尖发出的电子使下面的氢脱附而露出清洁的Si表面，针尖沿表面扫描就能得到线条状或其他几何形状的清洁Si表面，线宽10Å。北京真空物理所也报道了用STM在Si（111）7×7表面在直流偏压作用下获得原子级平直沟的成果。

7）原子级加工技术正在研究对大分子中的原子搬迁、增加原子、去除原子和原子排列的重组。这无疑可以创造很多按人类需要而制成的新材料，对蛋白质分子的修改将对纳米生物学开拓一个广阔的新天地。

第五节　纳米级器件、微型机械和微型机电系统

一、纳米级器件

1. 原子开关和原子继电器

STM 的探针针尖的原子对准并接近试件表面的某原子时，产生隧道电流，电子将通过这相对的两原子，成为导通状态，通过电场可使这隧道电流截止，这实际上就是一个原子级的电子开关。

原子级的开关可以实现单个电子通过隧道的控制。对于由势垒和周围隔开的体系，当单个电子由隧道效应进入体系，就将导致体系静电能量的变化，这一能量标度为 $e^2/2C$，通常称为体系的充电能量，C 为体系的电容，e 为电子电量。如果 C 很小就不能忽略充电能量的作用，如果外界不能提供足够能量，则电子就不能进入体系，根据这原理就可以对单个电子的通行进行操纵和控制。

原子级开关可以使原子通过或去除，相当于“写入”与“存储”信息。

随着单原子操纵的进展，通过控制单原子实现原子器件功能的研究工作也积极进行。1993 年日本日立公司的 Y. Wada 提出做原子继电器的设想，在一维原子链中嵌入开关原子，可用作和它垂直的原子链作栅，即通过电场使开关原子进入或退出原子链，使被控制的原子链呈导通或截止状态。这原子继电器实际上是具备了一定程度的晶体管的功能，由栅极控制其导通或截止。

2. 原子级器件

原子级器件的实现，依赖 STM 或相关的单原子操纵设备的大规模集成，这方面正在研究并已取得一定进展。原子级器件的研究现在有从金属转向半导体的趋向。

荷兰菲利浦研究所的 C. Schroenenberger 等人在 1992 年报导了在 100nm 厚的金膜上生长 0.5～1nm 厚的 ZrO_2 层，在其上再形成直径 4～5nm 的金粒，将 STM 的针尖对准金粒的上方，就构成了不对称双隧道结体系。由于库仑阻塞效应，不对称双隧道结的伏安特性呈台阶状。对双隧道结器件的岛区接一普通电容，并用栅压通过此电容来控制岛区的电势，就构成了单电子晶体管。这种器件的一大特点是其电导随栅压作周期性振荡，每振荡一周期相当于岛区增加一个电子。

二、微型机械

在微型机械的尺寸范围内，依其特征尺寸可以划分成三个等级：1～10mm 的是小型机械，1μm～1mm 的是微型机械，1nm～1μm 的是纳米机械。但广义的微型机械是包含上列三个等级的微小机械。

1959 年就有科学家提出微型机械的设想，1962 年制成第一个硅微型压力传感器。美国斯坦福大学 1970 年开始这方面的研究工作，其后美国欧洲很多学校研究所都开始了微型机械的开发研究。微型机械的研究涉及面广、难度大，但受到大家普遍的重视。现在世界各地每年都召开这方面的国际学术会议，跨国的电气工程师学会（IEEE）建立了一个微机械电子产品

工厂，美国国家科学财团（NST）于 1988 年资助 8 所大学 100 万美元作为这方面研究的起动费，1989 年又将这费用增加了一倍。

现在微型机械的研究已达到较高水平，已能制造多种微型零件和微型机构。美国斯坦福大学已研制出直径 20μm、长 150μm 的铰链连杆，210×100μm 的滑块机构、转子直径 200μm 的静电马达，每分钟 20ml 的液压泵等。美国加州大学伯克利分校在微型机械的研制获得不少成果，研制成功 60～120μm 大的硅微型静电马达，直径 50μm 的旋转关节，微型齿轮驱动的滑块和灵敏的微型弹簧等。该校的微型传感器与驱动器的研究中心得到美国国家标准科学基金会，国防部和十多家大公司的资助开展微型机械的研究工作，并耗资 1500 万美元建起了一千一百多平方米的玻璃隔离无尘实验室，进行这方面的研究工作。

现在已研制成功的三维微型机械构件有：微膜、微梁、微针、微齿轮、微凸轮、微弹簧、微沟道、微喷嘴、微锥体、微轴承、微连杆等等。

已研制成功多种微型传感器，其敏感量为：位置、速度、加速度、压力、力、力矩、流量、磁场、温度、气体成分、湿度、pH 值、离子浓度等等。

微执行器是比较复杂、难度大的微形器件，研制成功的有：微阀、微泵、微开关、微扬声器、微谐振器、微电机等等。微执行器是具有一定功能的微型部件，也可算是微型机电系统（MEMS）的一个分系统，一个比较简单的微系统。

三、微型机电系统（MEMS）

1. 微型机电系统的提出

微型和纳米机械，微型和超微型机电系统是纳米技术将来走向实用化、具有产生经济效益的主要领域。

早期的微型机械是微型机械零件和微型机械机构，使这些机械机构体积大大缩小。但这些机械需要信息输入的传感器，需要使它工作的驱动器，需要将运动输出或信号输出的接口，这些辅助装置和联结机构的尺寸，大大超过了微型机械本身，不能满足生产实际的要求。因此很自然的就发展起来了微型机电系统。微型机电系统的组成框图见图 10-17，它是将微型机械，信息输入的微型传感器，电源，驱动器，控制器，模拟或数字信号的处理器，输出信号接口等都微型化并集成在一起，成为一个微型机电系统。它有较强的独立运行能力，并有能完成规定工作的功能。微型机电系统内部可分成几个独立的功能单元，同时又集成成为一个统一的系统。

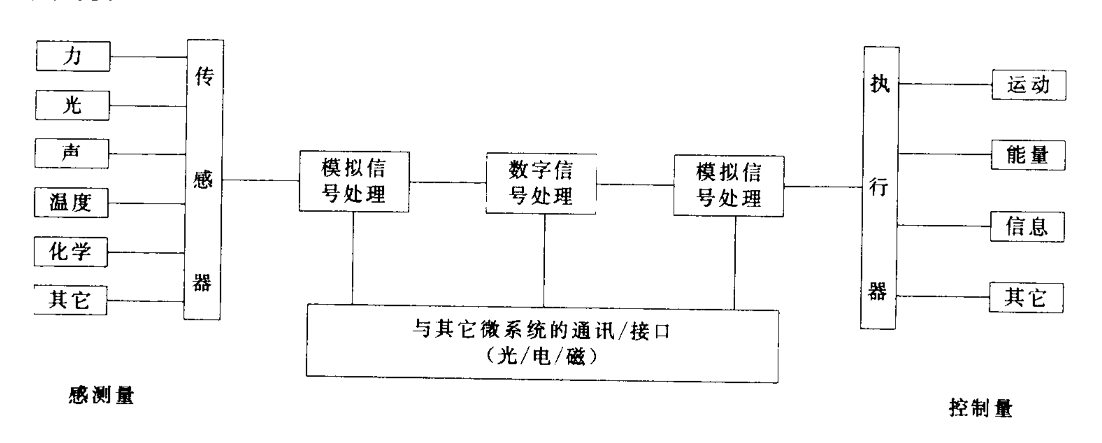


图10-17　微型机电系统的组成框图

集成的微型机电系统在日本仍习惯地称为微型机械（Micromachine），美国则称之为微型机电系统（Micro Electro Meehanical Systems，略称MEMS），在欧洲则称为微系统（Microsystems）。应该指出这微型系统虽然被称为微型机电系统，可是它的含意决不只是机械和电器件的集成，需要时可以包括声、光、化学和其他物理量的微型传感器和器件，可以包括光学系统或其他系统，称为机电系统只是一个统称。

2. 基本技术的研究

MEMS涉及的基本技术面极广，例如微系统的设计与仿真；微机械零部件使用的材料，其中有些材料是很特殊的；微型机械零件或微结构的加工；微型零件的组装；微型零件和部件的检测；微驱动能源；控制器和系统的控制；部件的集成和功能检测等。现将MEMS所用的基本技术分类归纳，如图10-18所示，主要有下面几方面。

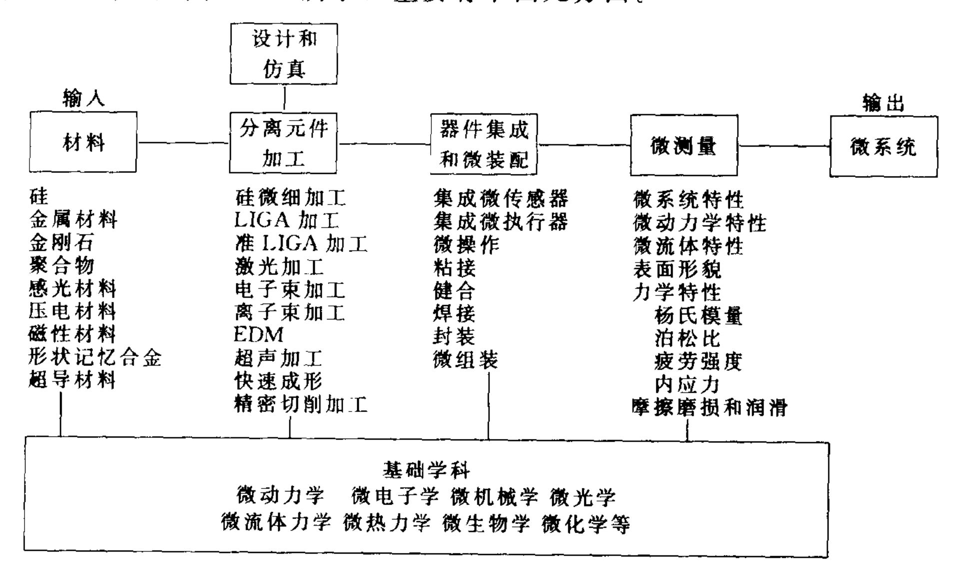


图10-18 MEMS涉及的基本技术

1）MEMS的设计技术 有微结构设计，设计数据库，有限元分析，CAD/CAM、仿真，实验验证等。

2）MEMS的微细加工技术 集成电路的加工技术，LIGA，特种精密加工和组装集成技术。

3）微型机械的材料 包括结构材料和功能材料。

4）微型构件 微型传感器和微型执行器：微型构件是组成MEMS的基础，同时它也可以用作独立器件，有微梁，微齿轮，微轴承等；微型传感器为MEMS的智能化和集成化提供了可能，有位置传感器，力传感器，温度传感器等；微执行器是复杂微系统的关键，有微阀，微泵，微电机等。

5）微机构和微机电系统的检测 涉及微机构的性能检测，如强度、弹性模量、应力、应变等；微系统的检测包括其工作参数、功能等。

6）微机电系统的集成 包括系统设计，微型机械、微型传感器、执行器和控制器的集成，能源供应，接口与通讯等。

3. MEMS的发展前景

MEMS可以在许多领域和部门得到应用，如医疗和外科手术设备，航空航天工业，科学

仪器，通讯设备仪器，传感器工业，日用产品和国防工业应用。

MEMS 在下列部门估计可有广宽的应用前景：

1）专用集成微型仪器

2）微型机器人

3）惯性仪表

4）小型、微型和“纳米卫星”

5）微光机电系统

复习思考题

10-1 试述纳米技术对发展尖端技术和国防工业的重要性。

10-2 二十年来纳米技术有哪些最重要的进展?

10-3 纳米级的测量主要包括哪些参数的测量?

10-4 说明用于纳米测量的 X 射线干涉测量的原理和方法。

10-5 说明 F-P 干涉仪的测量原理和方法。

10-6 扫描隧道显微镜（STM）的功能有哪些？达到怎样的测量分辨率?

10-7 说明 STM 的工作原理和隧道电流控制恒定的方法。

10-8 介绍一种两维微位移工作台的结构和工作原理。

10-9 和 STM 类似原理的纳米级扫描显微测量仪器有哪些?

10-10 说明原子力显微镜的工作原理和测量分辨率。

10-11 说明纳米级表层显微力学探针检测方法的功能和用途。

10-12 说明表层显微力学探针法检测材料表层硬度的原理。

10-13 说明表层显微力学探针法检测材料表层弹性模量的原理，检测蠕变性能的原理。

10-14 说明纳米级精度的含义和所包含的内容。

10-15 简述纳米级精密加工包含的主要的、不同工作原理的加工方法。

10-16 简述纳米级精密机械加工的方法、适用范围和能达到的精度。

10-17 简述 LIGA 加工方法的原理、主要的关键技术和应用范围。

10-18 简述准 LIGA 加工方法的原理和方法。

10-19 简述用 STM 进行原子级加工的原理、方法和应用范围。

10-20 简述用 STM 进行原子重组的可能应用范围。

10-21 原子、分子级的电路和传感器的应用前景如何?

10-22 说明发展微型机械和微型机电系统的重要意义。

10-23 说明小型机械、微型机械和纳米机械的尺度范围。

10-24 微型机械和微型机电系统（MEMS）包含什么内容?

参考文献

1 国家自然科学基金会发展战略研究组．机械制造学科（冷加工）—发展战略调研报告．北京：科学出版社，1994

2 袁哲俊，周明．加速发展我国的精密和超精密加工技术．工具技术．1994，(2)

3 谭汝谋．加强我国精密．超精密加工技术的研究与发展．机床．1992，(11)

4 王先逵．机械制造工艺学．北京：清华大学出版社，1989

5 王先逵主编．机械制造工艺学．北京：机械工业出版，1995

6 王先逵主编．精密及超精密加工．机械加工手册第2卷第14章．北京：机械工业出版社，1991

7 郑焕文，王宛山．机械制造工艺学．沈阳：东北工学院出版社，1988

8 刘贺云，柳世传．精密加工技术．武汉：华中理工大学出版社，1991

9 李晋年，袁哲俊等．黑色金属的超低温金刚石超精密切削．机械工程学报．1989，(1)

10 袁哲俊，周明．金刚石刀具刀刃锋锐度对切削变形和加工表面质量的影响．机床．1992，(11)

11 吴超，袁哲俊．超精密加工机床静压空气轴承的主轴部件．机械工程师．1994，(2)

12 赵培炎．超精密加工中温度控制及对策．航空精密制造技术．1991，(1)

13 童竞主编．几何量测量．北京：机械工业出版社，1987

14 李鹏生．新技术在几何量计量中的应用．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1989

15 房丰洲，袁哲俊．超精密机床定位测量技术．中国机械工程．1994，(2)

16 袁哲俊，程凯．精密加工中误差补偿技术及其应用．机床．1990，(8)

17 微细加工技术编委．微细加工技术．朱怀义，赵巾奎译．北京：科学出版社，1983

18 蒋欣荣编著．微细加工技术．北京：电子工业出版社，1990

19 袁巨龙，袁哲俊．石英基片双面抛光加工的研究．机床．1990，(8)

20 仪器仪表学报（纳米技术增刊）．1995，Vol 16 (1)

21 仪器仪表学报（纳米技术增刊）．1996，Vol 17 (1)

22 Mckeown P. A. The Role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future. Annals of the CIRP. 1987, Vol. 36 (2)

23 Mckeown P. A. et al, High Precision Engineering in the 1990's. Proc. of CIRP conf. on PE&MS. China, 1991

24 IkawaN. et al. Ultraprecision Metal Cutting in the Past, the Prsent, and the Future. Annals of the CIRP. 1991, Vol. 40 (2)

25 Ikawa N. et al, Non-Destructive Strength Evaluation of Diamond for Ultra-Precision Cutting Tool. Annals of the CIRP. 1985, Vol. 34 (1)

26 Yuan Z. J., He, J. C., Yao Y. X. The Optimum Crystal Plane of Natural Diamond Tool for Precision Machining. Annals of the CIRP. 1992, Vol. 41 (1)

27 Yuan Z. Y., Geng L., Dong S. Ultra-precision Machining of SiCw/Al Composites. Annals of the CIRP. 1993, Vol. 42 (1)

28 Yuan Z. Y., Lee W. B., et al. Effect of Crystallographic Orientation on Cutting Forces and Surface Quality in Diamond Cutting of Single Crystal. Annals of the CIRP. 1994, Vol. 43 (1)

29 Yuan Z. J., Zhou M. Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultraprecision Machining. Journal of Materials Processing Technology. 1996, Vol. 62 (1)

30 Zhou M. , Yuan Z. J, A New Method for the Detemination of Crystallographic Orientation of Diamonds. Proceedins of the 7th IMCC Conference. Harbin, 1995

31 Debra D. B, et al, Shower and High Pressure Oil Temperature Control. Annals of the CIRP, 1986, Vol. 35 (1)

32 Leadbeafer B. Clarke M, et al. A Unique Machine for Grinding Large, Off-axis, Optical Components the OAGM2500. Proceedings of the 5th Infernational Precision Engineering Seminar. Monterey, U. S. A, 1989

33 Wang X. H. , Yuan Z. J. The Experimental Study of Micro-tool Servo with Electrostrictive Actuator. Journal of HIT. 1994, (2)

34 Komanduri R. ,Lucca D. A. Technological Advances in Fine Abrasive Process. Annals of the CIRP. 1997. Vol. 46 (2)

35 Vorburger T. V. Dagata J. A. Industrial Uses of the STM and AFM>, Annals of the CIRP, 1997. Vol. 46 (2)

36 Yuan Z. J. , Gao D. Study on Micro-hardness of Material in nanometer Scale. Proceedings of 8th 1MCC Conf. Singapore, 1998

37 〔日〕编集代表小林昭. 超精密加工技术实用マニアル. 东京：新技术开发セソター，1985

38 〔日〕田中羲信，津和秀夫，井川直哉. 精密工作法. 东京：共立出版株式会社. 上册，昭和 54 年，下册，昭和 57 年

39 〔日〕砥粒加工研究会熊谷记念会编. 超精密加工技术. 东京：工业调查会，昭和 59 年

40 〔日〕井川直哉等. 超精密切削加工の精度极限. 精密工学会志：1986，Vol. 52 (12)

41 〔日〕井川直哉，岛田尚一等. Chip Morphology and Minimum Thickness of Cut in Micromachining. 精密工学会志 1993，Vol. 59 (4)

42 〔日〕白坚高洋等. Simulation of Cutting Process of Single-crystal Aluminum in Ultra-Fine Machining. 精密工学会志 1991，Vol. 57 (5)

43 〔日〕上野进. 超精密加工机床的静压轴承主轴. 机床与工具，超精密加工特集. 1987，(12)

44 〔日〕杉田和彦. 超精密机床的静压轴承主轴. 机床与工具，超精密加工特集. 1987，(12)

45 〔日〕田中克敏. 超精密机床的床身导轨. 机床与工具超精密加工特集. 1987，(12)

46 〔日〕诸贯信行. 超精密加工机床的驱动方式. 机床与工具超精密加工特集. 1987，(12)

47 〔日〕冈崎佑一. 压电传感器式微位移系统. 机床与工具，超精密加工特集. 1987，(12)

48 〔日〕谷口纪男. 超微细加工技术の现状と将来の课题 (1). 机械の研究，1982，第 34 卷 (5)